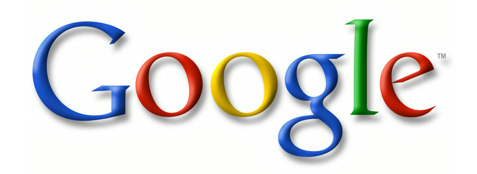
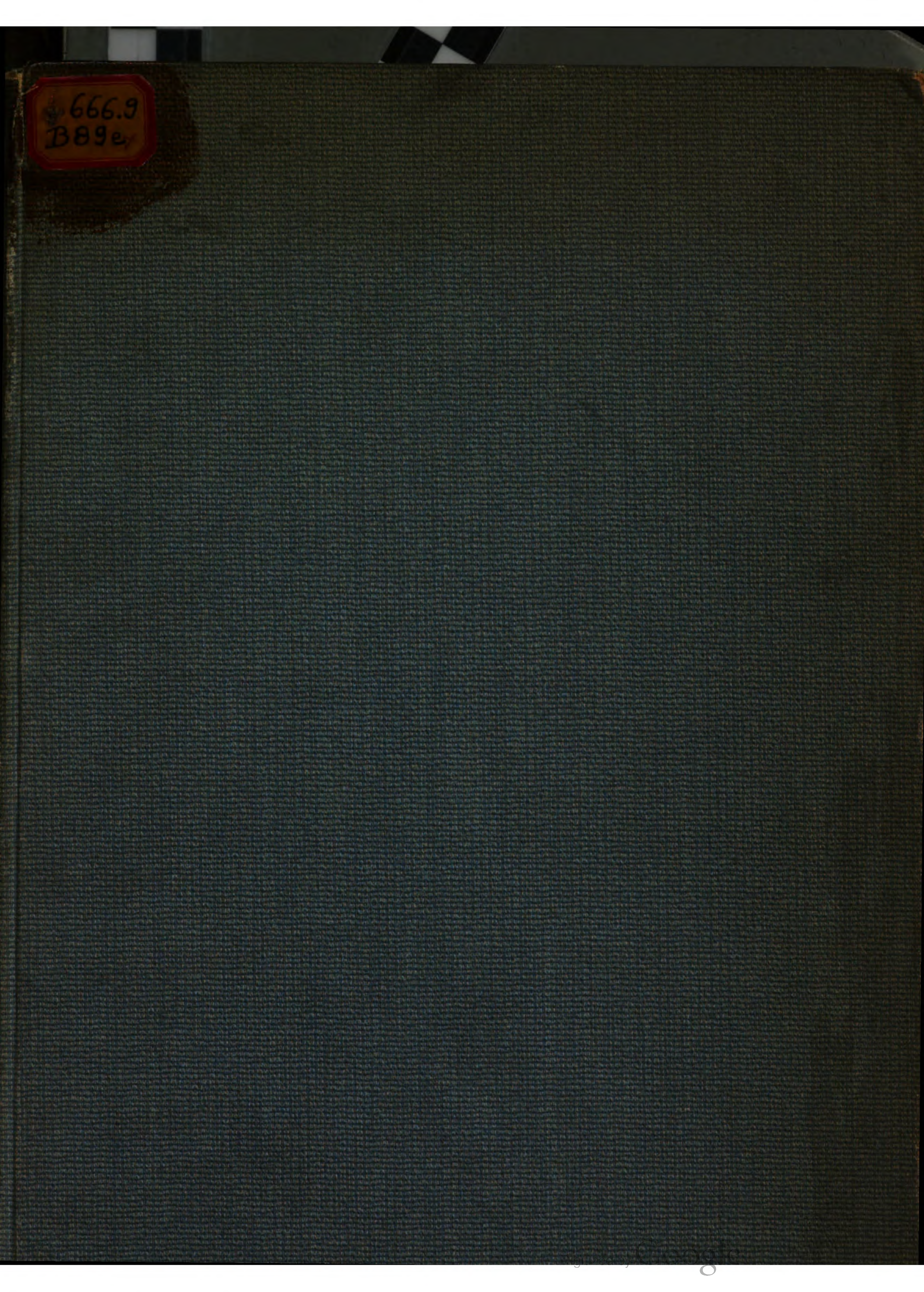
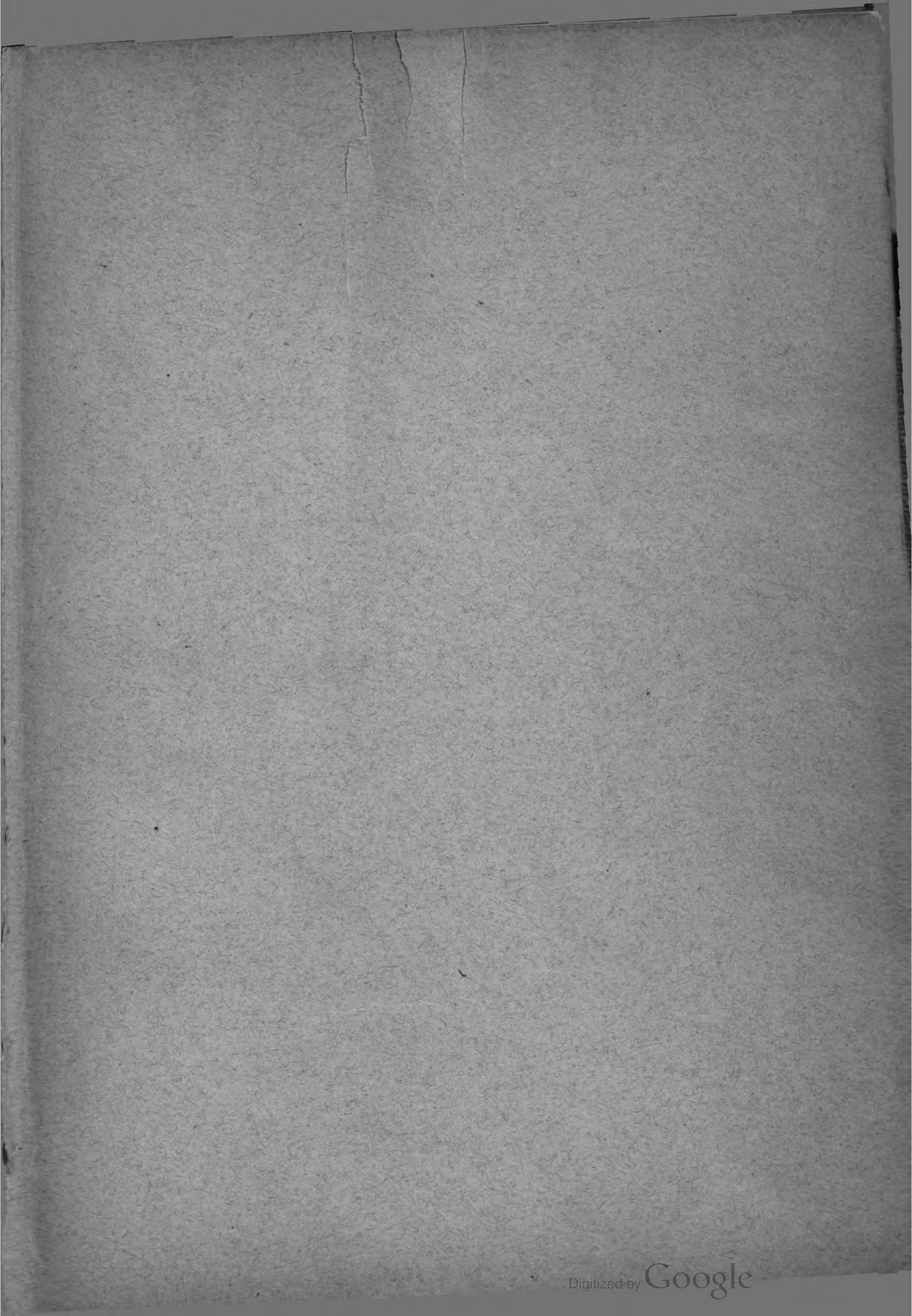
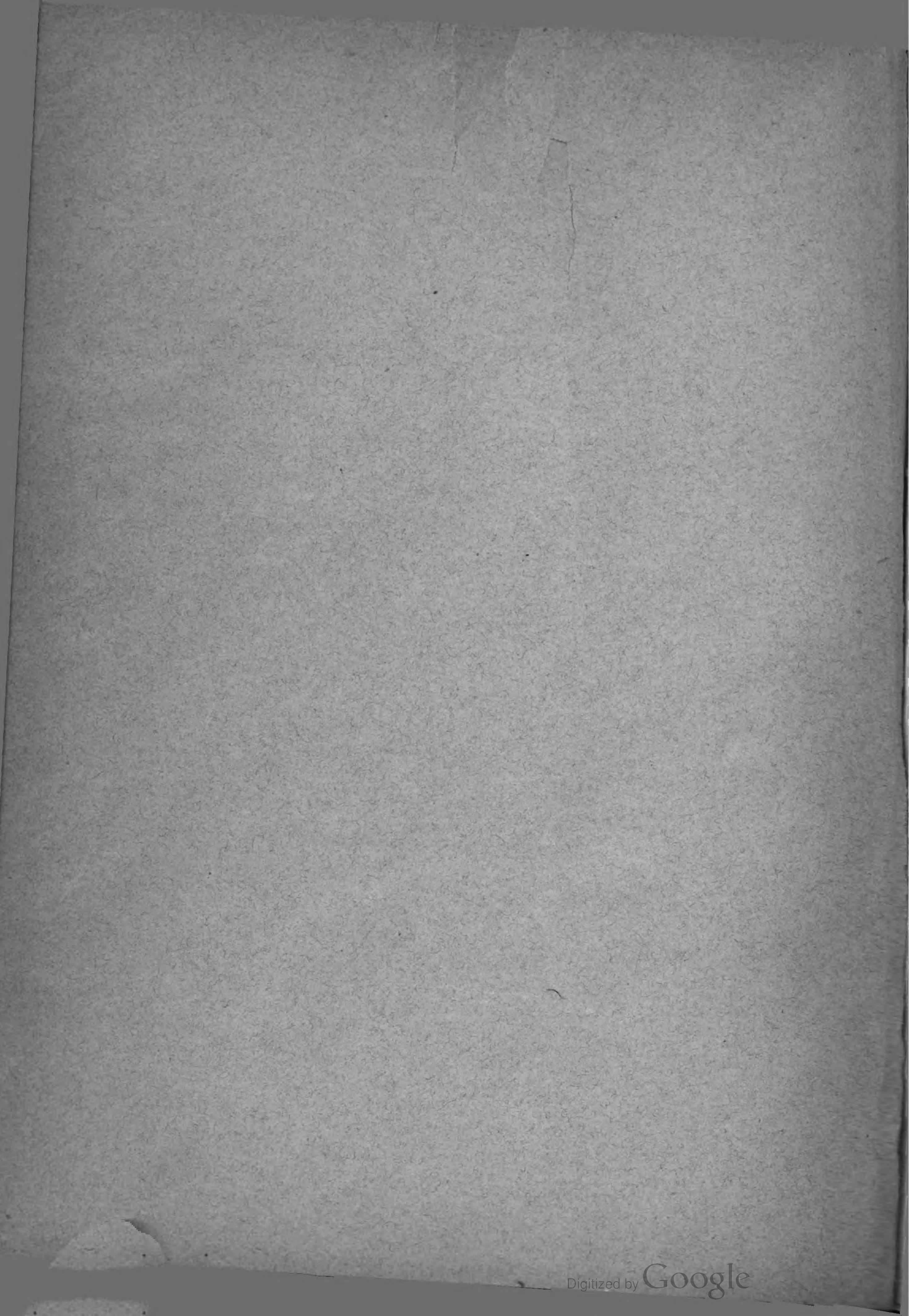










Luftkalke und Luftkalkmörtel.

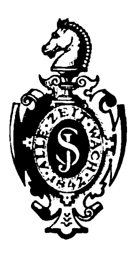
Ergebnisse von Versuchen, ausgeführt im Königlichen Materialprüfungsamt zu Groß-Lichterfelde West.

Von

H. Burchartz,

Ständiger Mitarbeiter der Abteilung für Baumaterialprüfung am Königlichen Materialprüfungsamt zu Groß-Lichterfelde West.

Mit 80 Textfiguren.



Berlin.

Verlag von Julius Springer

1908.

Druck der Kgl. Universitätsdruckerei von H. Stürtz in Würzburg.

Vorwort.

Die Versuche, die die Grundlage zu den nachstehenden Erörterungen bilden, sind in der früheren „Königlichen Mechanisch-Technischen Versuchsanstalt" zu Charlottenburg und dem jetzigen „Königlichen Materialprüfungsamt" zu Groß-Lichterfelde auf Anregung des Verfassers ausgeführt worden. Ihre Anfänge liegen etwa acht Jahre zurück. Anlaß hierzu gab das Fehlen zuverlässiger Werte für die Festigkeit von Mauerwerk, namentlich von solchem in Kalkmörtel, das in Baukreisen seit langem als Mangel empfunden worden ist. Diese Lücke soll durch Bekanntgabe der Ergebnisse genannter Versuche soweit als möglich ausgefüllt werden.

Fast alle bis jetzt bekannt gewordenen Festigkeitsversuche mit Mauerwerkskörpern sind entweder mit zu kleinen Probekörpern ausgeführt oder weisen Mängel anderer Art auf, die die Anwendung ihrer Ergebnisse auf die praktischen Verhältnisse nicht gestatten; vor allen Dingen lassen sie die tatsächlichen Beziehungen zwischen Steinfestigkeit, Mörtelwerksfestigkeit und Mauerfestigkeit vermissen. Als Beweis hierfür können sogar die beiden bedeutsamsten Versuchsreihen dieser Art gelten, nämlich die im Jahre 1883 von dem Leiter der ehemaligen „Königlichen Prüfungsstation für Baumaterialien", Prof. Dr. Böhme[1]), und die in den Jahren 1896—1898 auf Veranlassung des Ausschusses des „Royal Institute of British Architects"[2]) von Prof. Unwin ausgeführten Versuche, die in ihrer Art als grundlegend betrachtet werden können. Auf diese Untersuchungen ist weiter unten näher eingegangen.

Zur Klärung der Sachlage wurden Druckversuche mit Körpern aus zusammengemauerten oder zusammengelegten Steinhälften, mit aus Steinen geschnittenen Materialwürfeln und mit in Verband gemauerten, unter Verwendung verschiedener Steinsorten und Mörtelarten hergestellten Mauerwerkskörpern ausgeführt.

Weitere Untersuchungen bezogen sich auf die Feststellung der Haftfestigkeit und der Scher-(Schub-)festigkeit von Kalk- und Zementmörtel, sowie auf die Ermittelung der Beziehungen zwischen der Druckfestigkeit der Mauersteine, nach dem üblichen Verfahren an zusammengemauerten Steinhälften ermittelt, und der Materialfestigkeit, bestimmt an Würfeln, die aus den Steinen herausgeschnitten waren.

1) Mitt. Materialpr.-Amt 1884. S. 80 ff.

2) Journal of the Royal Institute of British Architects 1886—1889.

Das Studium der Literatur über Kalkmörtel und Luftkalkmörtel gab Anlaß zur Ausdehnung der Prüfungen auf Versuche mit Luftkalkmörteln. Diese Studien sind in dem ersten Abschnitte dieser Arbeit behandelt, während die Untersuchungen über die Festigkeitseigenschaften von Kalkmörtel und von Mauerwerk in Kalkmörtel (und zum Vergleich auch von solchem in Zementmörtel) im zweiten Abschnitte erörtert sind.

Die zu den Untersuchungen verwendeten Kalke waren Luftkalke, d. h. Kalke mit mehr als 90 % Ätzkalk [1]); die benutzten Sande waren, soweit es darauf ankam, die Erhärtung der Kalkmörtel an sich und ohne Beeinflussung durch etwaige hydraulisch wirkende Stoffe zu beobachten, reine Quarzsande, d. h. Sande, die keine lösliche Kieselsäure enthielten, die also für sich keine hydraulische Erhärtung der Mörtel bewirken konnten. Die Probekörper für die Festigkeitsversuche lagerten an der Luft im Zimmer, soweit nicht anderweitige Angaben über die Erhärtung der Proben im Text oder in den Tabellen gemacht sind.

Zur Gewinnung zuverlässiger Zahlen mußten trotz der vielen Einzelwerte die gleichen Reihen öfter wiederholt werden.

Da aber die Wiedergabe aller Werte viele und umfangreiche Tabellen benötigt und die Übersicht über die Ergebnisse sehr erschwert haben würde, sind in den Fällen, in denen die Zuverlässigkeit des Prüfungsergebnisses durch die Häufigkeit der Einzelversuche und durch die Übereinstimmung der Einzelwerte jeder Reihe gewährleistet erschien, lediglich die Mittelwerte wiedergegeben; wo es von Wert sein konnte, sind indessen auch die Werte der Einzelversuche mitgeteilt.

Sämtliche Analysen und sonstige chemische Bestimmungen sind von Herrn Dr. Berkhoff, dem ersten ständigen Assistenten der Abteilung für Baumaterialprüfung, ausgeführt, dem ich wärmsten Dank abstatte für die Unterstützung in allen chemischen Fragen und für die Anregungen, die er mir gegeben. Auch unterlasse ich nicht dem Leiter des Kgl. Materialprüfungsamtes, Herrn Geh. Regierungsrat Dr. ing. h. c. A. Martens, meinen herzlichsten Dank für seine Unterstützung bei der Abfassung der Arbeit und für seine wertvollen Hinweise auszusprechen.

---

[1]) Mit einer einzigen Ausnahme, nämlich eines Kalkes mit nur 85 % Ätzkalk.

Groß-Lichterfelde im Januar 1908.

Der Verfasser.

Inhaltsverzeichnis.

Abkürzungen.

R_f = Litergewicht im eingelaufenen Zustande.
R_l = Litergewicht im eingefüllten Zustande.
R_r = Litergewicht im eingerüttelten Zustande.
G = Gewicht.
I = Inhalt.
E = Ergiebigkeit.
σ_B = Zugfestigkeit.
σ_{-B} = Druckfestigkeit.

I. Abschnitt.

Die Luftkalke und Luftkalkmörtel.

Die wichtige Rolle, die der Kalkmörtel aus Luftkalk in der Bautechnik spielt, legt die Frage nahe:

> Welche Verhältnisse können bei der Beurteilung der Beschaffenheit und Verwendbarkeit der Luftkalke und deren Mörtel in betracht kommen und welche Umstände beeinflussen die Erhärtungsfähigkeit der Luftkalkmörtel? Welche Umstände sind von Einfluß auf die Beschaffenheit genannter Mörtel vor der Verarbeitung? Welche Verhältnisse beeinflussen die Erhärtung und die Festigkeit dieser Mörtel nach dem Vermauern?

Was man von den Eigenschaften der Luftkalke und Luftkalkmörtel weiß, stützt sich, abgesehen von den Kenntnissen über die chemische Zusammensetzung der Luftkalke und die chemischen Vorgänge beim Brennen, Ablöschen und Erhärten, fast ausschließlich auf praktische Erfahrungen und nicht auf planmäßige Versuche.

In der Literatur[1]) findet man wohl, außer den Analysen, Angaben über die Erzeugung, das Ablöschen und die Erhärtungstheorie der Luftkalke, jedoch abgesehen von den zerstreut in den „Mitteilungen aus den kgl. technischen Versuchsanstalten" (jetzt Materialprüfungsamt) veröffentlichten Festigkeitsergebnissen keine maßgebenden Zahlenangaben über die Festigkeit solcher Mörtel, über deren Erhärtung oder über die Beeinflussung der letzteren durch innere oder äußere Verhältnisse.

a) Begriffserklärung für Luftkalke.

Luftkalke sind, im Gegensatz zu sogenannten Wasser- oder hydraulischen Kalken, Kalke, die nur an der Luft erhärten. Man nennt sie auch aus diesem Grunde unselbständig erhärtende Mörtel, zum Unterschiede von den selbständig erhärtenden, die auch unter Luftabschluß fest werden und mit fortschreitendem Alter an Festigkeit zunehmen. Man nennt die Luftkalke wegen ihres hohen

[1]) Wolters, Dinglers polytechn. Journ. Dr. Ziureck, Zeitschr. f. Bauwesen. 1861. Gottgetreu, Physische und chemische Beschaffenheit der Baumaterialien. Bd. 2. 1881. Verlag Julius Springer, Berlin. Hauenschild, Katechismus der Baumaterialien. II. T. Die Mörtelsubstanzen. 1879. Verlag Lehmann & Wentzel, Wien. Feichtinger, Die chemische Technologie der Mörtelmaterialien. 1885. Verlag Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig. Heusinger von Waldegg, Die Kalkbrennerei und Zementfabrikation. 1903. Verlag Th. Thomas, Leipzig. Schoch, Die moderne Aufbereitung der Mörtelmaterialien. 1904. Verlag d. Tonindustrie-Zeitung, Berlin. K. R. Lehmann und H. Chr. Nußbaum, Archiv f. Hygiene. Bd. 9. S. 139 u. 223.

Gehaltes an Kalk auch „Fettkalke“ und wegen ihrer nach dem Ablöschen meist rein weißen Farbe „Weißkalke“. Sinkt der Kalkgehalt unter eine gewisse bis jetzt noch nicht genau festgelegte Grenze und steigt statt dessen der Ton- oder Magnesiagehalt, so hat man es mit Mager- oder Wasserkalken [1]) zu tun.

Die Schweizer Normen [2]) geben für Luftkalk folgende Begriffserklärung:

„Luftkalke sind Erzeugnisse, gewonnen durch Brennen von Kalksteinen. Nach örtlichen Verhältnissen werden die Luftkalke in Stückform oder hydratisiert in Pulverform in den Handel gebracht.“

Bemerkungen:

„Alle gargebrannten, krystallinisch körnigen oder dichten Kalksteine, die beim Löschen unter erheblicher Wärmeentwickelung und Raumvergrößerung (Gedeihen) in ein mehlig weiches Pulver (Kalkhydrat) zerfallen, liefern Luftkalk.

Beim Löschen geht der Ätzkalk zunächst in pulverförmiges Kalkhydrat (Trockenlöschverfahren), bei weiterer Wasserzufuhr in einen Brei über (Naßlöschverfahren). Durch noch weiteren Wasserzusatz wird Kalkmilch erzeugt.

Vor der Verwendung ist Kalkbrei einzusumpfen, damit unaufgeschlossene Teilchen sich nachträglich löschen und zerfallen können.

Der Kalkbrei wird dadurch gleichmäßiger, dichter, geschmeidiger und vor allem zuverlässiger; eingesumpfter Luftkalkbrei verliert die Tendenz, sich nachträglich zu löschen und treibrissig zu werden.

Durch das Trockenlöschverfahren wird Kalkhydrat in Pulverform erzeugt. Auch als Nebenprodukt bei der Fabrikation des hydraulischen Kalkes nach dem Separationsverfahren wird ein mehr oder weniger magerer, pulverförmiger Luftkalk gewonnen. Die nach örtlichen Verhältnissen in wechselnden Mengen vorhandenen hydraulischen Bestandteile steigern die an sich vorteilhafte Verwendung des pulverförmigen Luftkalkes im Hochbauwesen.

Der Luftmörtel erhärtet im feuchten Zustande durch Aufnahme von Kohlensäure der Luft allmählich fortschreitend von außen nach innen. Im Wasser löst sich der Luftkalk auf.“

b) Eigenschaften der Luftkalke.

Von maßgebendem Einfluß auf die Güte und die spätere Erhärtungsenergie des Luftkalkmörtels ist in erster Linie die Beschaffenheit des Bindemittelstoffes selbst.

Reinheit. Man fordert von gutem Luftkalk, daß er, richtiges Brennen und Löschen vorausgesetzt, möglichst rein sei, d. h. möglichst hohen Gehalt an Kalk (Ätzkalk) habe und möglichst frei von Tonerde und Kieselsäure sei. Je reiner der Kalk, desto ergiebiger ist er.

Heusinger von Waldegg bezeichnet noch Kalk, der weniger als 10 v. H. Kieselsäure oder Tonerde enthält, als fetten Kalk, d. h. Luftkalk, als mageren Kalk dagegen solchen, der 15—30 v. H. fremde Bestandteile (Tonerde, Eisenoxyd, Magnesia) enthält. Tatsächlich tut das Vorhandensein solcher Bestandteile der Güte der Kalke, soweit die Erhärtungsfähigkeit in Betracht kommt, keinen Abbruch; im Gegenteil bewirken sie Erhöhung der Festigkeit durch die eintretende hydraulische Erhärtung, daher für die Magerkalke auch die Bezeichnung hydraulischer (wassererhärtender) Kalk. Auf die Zusammensetzung der Kalke muß sowohl beim Brennen als auch beim Ablöschen und Verarbeiten Rücksicht genommen werden. Technisch unrichtige Behandlung der Kalke kann sehr nachteilige Folgen für das daraus hergestellte Mauerwerk haben.

---

[1]) Burchartz, Hydraulische Kalke; Mitt. Materialpr.-Amt 1902. S. 255 ff.

[2]) Normen für eine einheitliche Benennung, Klassifikation und Prüfung der hydraulischen Bindemittel. Herausgegeben von der Schweiz. Materialprüfungsanstalt zu Zürich. Selbstverlag der Anstalt. Jahrg. 1901.



Je nach dem Grade der Raumvergrößerung der Masse beim Ablöschen (Gedeihen) unterscheidet man fette und magere Kalke. Man nennt den Kalk fett, wenn er sich zu einem zarten, unfühlbaren Mehl oder einem weichen, speckigen Brei löscht, und mager, wenn er nach dem Löschen ein mehr oder minder körniges Pulver oder einen körnig oder sandig sich anfühlenden Brei hinterläßt.

Brand. Der Kalk muß gut (gar) gebrannt sein, um größtmögliche Energie beim Ablöschen entfalten zu können; er soll nach dem Brennen keinen oder nur wenig kohlensauren Kalk mehr enthalten.

Frische. Der Kalk soll frisch gebrannt verwendet werden. Abgelagerter Kalk ist, wenn er atmosphärischer Luft ausgesetzt gewesen ist, im Ablöschen begriffen und hat zum Teil Wasser und Kohlensäure aufgenommen. Solcher Kalk gibt daher auch weniger Raumvergrößerung als frischer. Die abgelöschten und in kohlensauren Kalk übergegangenen Teile sind für die spätere Erhärtung unwirksam. Gebrannter Kalk ist deshalb bei der Aufbewahrung möglichst gegen Luftzutritt zu schützen.

Zusammensetzung und Ablöschung (Wasseranspruch, Ergiebigkeit). Luftkalk wird zum Zweck der Mörtelbereitung im allgemeinen zu Kalkteig, seltener zu Kalkpulver, abgelöscht. Beim Löschen tritt infolge der Wasserbindung eine mehr oder weniger erhebliche Raumvergrößerung (Gedeihen, Wachsen, Ausbeute oder Ergiebigkeit) ein. Die Wasseraufnahme (bei Ablöschung zu Kalkteig chemisch und mechanisch, beim Ablöschen zu Kalkpulver nur chemisch) ist abhängig von dem Gehalt an Ätzkalk, der seinerseits wieder zum Teil bedingt ist durch den Brand und die Frische des Kalkes.

Die Art des Löschens mit Wasser soll nach praktischer Erfahrung die Güte des gewonnenen Kalkhydrats mehr oder weniger beeinflussen. Mit kaltem Wasser löscht der Kalk träge, mit warmem oder heißem Wasser energischer. Auch das Ablöschen mit zu reichlicher Wasserzugabe soll schädlich sein, weil hierdurch ebenfalls, wie durch kaltes Wasser, die zum Gedeihen nötige Wärmeentwickelung und damit der Löschvorgang beeinträchtigt wird (Ersäufen). Aus diesem Grunde soll auch das vielfach übliche vorherige Mischen des ungelöschten Kalkes mit dem Sande zu verwerfen sein.

Nach Feichtinger[1]) erfolgt die Ablöschung von Luftkalk am zweckmäßigsten in der Weise, daß man dem in Stücken zerkleinerten Kalk zunächst etwa ein Drittel der insgesamt zum Ablöschen erforderlichen Wassermenge zusetzt und nach Eintritt des Löschbeginns, der sich durch eine erhebliche Wärmeentwickelung — Kochen — bemerkbar macht, weiteres Wasser bis zum Ende des Löschens unter ständigem Rühren der Löschmasse in solcher Menge nachgibt, bis ein speckiger Teig entsteht. Dieses Verfahren wird auch gewöhnlich im Materialprüfungsamt angewendet.

Die aus einer bestimmten Menge gebrannten Kalkes gewonnene Menge an Kalkhydrat in Teigform gibt das Maß für die Ergiebigkeit des Kalkes, eines der praktisch wichtigen Unterscheidungsmerkmale der Fettkalke.

Um zu zeigen, innerhalb welcher Grenzen die Ergiebigkeit von Luftkalken schwanken kann, und welche Beziehungen zwischen dieser Eigenschaft und dem Kalkgehalt oder der chemischen Zusammensetzung überhaupt bestehen, sind in Tab. 1 die Ergebnisse sämtlicher seit dem Jahre 1896—1905 im Materialprüfungsamt mit Luftkalk ausgeführten Analysen und Ablöschversuche gegenübergestellt.

---

[1]) Notizblatt des Ziegler- und Kalkbrenner-Vereins. 1902. S. 67 und Feichtinger, Die chemische Technologie der Mörtelmaterialien. 1885. S. 65.

Tab. 1. **Ergebnisse der Prüfung von Luftkalken auf**

Die in den Spalten 3—10 schräg gedruckten Zahlen beziehen sich auf

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		14	15
		Analyse								Er-					
											Ablöschung				
Lfd. Nr. (Antrags-Nr.)	Herkunft oder Bezeichnung des Kalkes	Kieselsäure	Tonerde und Eisenoxyd	Kalk	Magnesia	Schwefelsäure	Unaufgeschlossener Rückstand	Glühverlust	Rest (Alkalien)	Gewicht für 1 l Stückkalk in Walnußgröße	Wasseranspruch	Beginn des Löschens nach Minut.	Dauer des Löschens Minut.	Gewicht G des aus 5 kg Stückkalk gewonnenen Kalkteiges	Rauminhalt J des aus 5 kg Stückkalk gewonnenen Kalkteiges
		%	%	%	%	%	%	%	%	kg	%			kg	l
															Luft-
1 (389)	Kalk aus Schlesien	5,82 *6,16*	1,74 *1,87*	83,75 **90,18**	0,94 *1,01*	0,44 *0,47*	— —	7,13 —	0,54 *0,58*	0,970	260	4	15	12,6	**9,3**
2 (673)	Gebrannter Stückkalk vom Harz	0,25 *0,26*	0,20 *0,21*	93,56 **97,83**	0,66 *0,69*	0,56 *0,58*	— —	4,36 —	0,41 *0,43*	1,119	278	2	11	bestimmt 17,3	**14,1**
3 (683)	Gebrannter Stückkalk aus Schlesien	0,22 *0,23*	0,21 *0,22*	93,40 **98,12**	0,82 *0,86*	0,08 *0,14*	— —	4,81 —	0,46 *0,48*	1,230	260	8	20	bestimmt 16,5	**13,0**
4 (1237)	Fettkalk vom Harz	5,41 *5,80*	1,87 *2,00*	84,92 **90,98**	1,14 *1,22*	— —	— —	6,90 —	— —	0,932	268	3	11	bestimmt 17,82	**14,4**
5 (2810)	Fettkalk aus Westfalen	2,22 *2,25*	1,48 *1,50*	93,43 **94,60**	0,81 *0,82*	0 03 *0,03*	— —	1,24 —	0,79 *0,80*	1,070	230	4	9	bestimmt 15,0	**11,4**
6 (3596)	Weißkalk aus Sachsen	1.04 *1,49*	0,70 *1,00*	67,94 **97,20**	0,28 *0,38*	0,02 *0,03*	Hydratwasser 56,03 —	30,10 —	Spuren —	0,599	282	5	8	bestimmt 18,3	**14,9**
7 (1978)	Stückkalk aus dem Rheinland	0,39 *1,14*	0,40[1]) 0,27[2]) *1,19*[1]) *0,81*[2])	31,23 **92,01**	0,78 *2,29*	0,18 *0,91*	— —	— —	0,31 *0,53*	0,713	300	3	7	bestimmt 19,05	**15,60**
8 (3642)	Stückkalk aus Dornap in Westfalen	0,73 *0,97*	0,40 *0,53*	73,04 **96,92**	0,70 *0,93*	0,50 *0,66*	— —	24,99 —	— —	0,748	275	7	12	bestimmt 17,65	**14,5**
9 (3322)	Weißkalk aus Dornap	0,04 *0,28*	1,80 *2,43*	70,94 **95,98**	1.06 *1,14*	— —	Hydratwasser 26,08 —	2,37 des Stückkalkes	0,08 *0,17*	0,953	300	1	5	bestimmt 20,43	**16,2**
10 (4303 a)	Kalk aus Mähren, Schönberg	0,22 *0,39*	0,10 *0,18*	Analyse des Rohkalkes 55,16 **98,29**	0,33 *0,59*	0,05 *0,09*	— —	43,88 —	0,26 *0,46*	0,875	310	14	20	bestimmt 19,94	**15,50**
11 (4303 b)		0 25 *0.45*	0,12 *0,21*	Analyse des Rohkalkes 55,24 **98.41**	0,21 *0,37*	0 06 *0,11*	— —	43,87 —	0,25 *0,45*	0,905	289	10	18	bestimmt 19,23	**15,50**
12 (4303 c)		0,36 *0,64*	0,10 *0,18*	Analyse des Rohkalkes 54,80 **97,53**	0,47 *0,84*	0,06 *0,11*	— —	43,81 —	0,40 *0,71*	0,839	325	2	13	bestimmt 20,56	**16,75**
13 (5181)	Stückkalk aus Mähren	0,58 *0,78*	0.42 *0,56*	72,68 **97,19**	0,57 *0,76*	— —	— —	25,22 —	0,53 *0,71*	0,837	302	6	11	bestimmt 18,95	**15,75**
14	Fettkalk aus Schlesien, von den Berliner Mörtelwerken bezogen	1,56 *2,04*	1,60 *2,09*	66,20 **86,52**	5,30 *6,93*	Spuren —	— —	25,34 —	— —	—	—	—	—	—	—

1) Eisenoxyd.

2) Tonerde.

3) Der Kalkteig wurde für diese Bestimmung mit Wasser verdünnt und durch ein 120-Maschensieb geschickt und ihm durch Absaugen auf Gipsplatten das Wasser soweit entzogen, daß der Wassergehalt etwa 50% betrug. Die in Klammern stehende Zahl gibt den Wassergehalt nach dem Absaugen an.

chemische Zusammensetzung und Ergiebigkeit.

das Material im geglühten (wasser- und kohlensäurefreien) Zustande.

16	17	18	19	20	21		22	23		24		25		26		27	28
giebigkeit																	
zu Kalkteig				Ablöschung zu Kalkpulver													Bemerkungen
Gewicht für 1 l Kalkteig		Rauminhalt d. Kalkteiges berechnet aus $E = \frac{G}{R_{r_1}}$	Gehalt an steinigen Rückständen 4)	Wasseranspruch	des Löschens		Gewicht des Kalkpulvers aus 5 kg Stückkalk unabgesiebt G	Gewicht für 1 l Kalkpulver				Rauminhalt des Kalkpulvers aus 5 kg Stückkalk				Gehalt an steinigen Rückständen	
R_r berechnet aus $\frac{G}{J}$	R_{r_1} ermittelt durch Einrütteln im Litergefäß 3)				Beginn	Dauer		unabgesiebt		abgesiebt 5)		unabgesiebt		abgesiebt			
					nach Minut.	Minut.		R_f	R_r	R_f	R_r	$E_1 = \frac{G}{R_f}$	$E_2 = \frac{G}{R_r}$	$E_3 = \frac{G_1}{R_f}$	$E_4 = \frac{G_1}{R_r}$		
kg	kg	l	%	%			kg	kg	kg	kg	kg	l	l	l	l	% 6)	
kalke																	
1,255	1,360	**9,25**	1,8	39,5	1/2	6	**6,7**	0,430	0,675	—	—	16,3	**9,9**	—	—	1,3	Nach altem Verfahren abgelöscht. Glühverlust des Kalkpulvers 22,21%.
1,227	nach 10 Tagen 1,315 (58,15 %)	**13,16**	6,3	38,0	1	6	**6,4**	0,434	0,679	—	—	14,8	**9,5**	—	—	15,4	Der Kalkteig hatte etwa 5 mm breite Risse.
1,269	nach 8 Tagen 1,322 (52,76 %)	**12,95**	0,0	44,4	2	10	**6,0**	0,439	0,649	—	—	13,9	**9,3**	—	—	6,0	Der Kalkteig hatte etwa 5 mm breite Risse.
1,237	nach 3 Tagen 1,340 (51,80 %)	**14,17**	0,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Glühverlust des Kalkteiges 65,8%. Der Kalkteig hatte etwa 5 mm breite Risse
1,226	nach 3 Tagen 1,316 (57,5 %)	**11,4**	0,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1 Liter des 28 Tage alten Kalkteiges wog 1,310 kg.
1,228	nach 7 Tagen 1,314 (55,90 %)	**13,92**	0,04	55,0	1	3	**7,08**	0,448	0,658	0,409	0,707	15,8	**10,8**	17,3	**10,0**	1,8	Nach 3 Tagen hatte der Kalkteig etwa 3 mm breite Risse.
1,221	nach 7 Tagen 1,309 (57,1 %)	**13,69**	0,5	54,0	1/2	3	**6,70**	0,439	0,647	0,397	0,690	15,26	**10,35**	16,88	**9,7**	0,2	—
1,217	nach 7 Tagen 1,316 (54,6 %)	**13,42**	—	46,6	1	4	**6,46**	0,422	0,662	0,380	0,673	15,3	**9,8**	17,0	**9,6**	0,0	—
1,263	nach 28 Tagen 1,282 (55,2 %)	**15,96**	0,0	58,0	sofort	2	**6,92**	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Der Kalkteig hatte nach 3 Tagen etwa 3 mm breite Risse. Gehalt des Kalkpulvers an hygroskopischem Wasser = 1,04%.
1,286	nach 7 Tagen 1,359 (50,5 %)	**14,66**	0,0	36,4	5	14	**6,31**	0,441	0,697	0,409	0,717	14,3	**9,1**	15,4	**8,8**	0,0	Nach 7 Tagen wies der Kalkteig an den Rändern etwa 2 mm breite Risse auf.
1,241	nach 7 Tagen 1,335 (52,7 %)	**14,41**	0,0	36,0	5	9	**6,13**	0,441	0,694	0,400	0,702	13,9	**8,8**	15,3	**8,7**	0,0	
1,227	nach 7 Tagen 1,305 (52,2 %)	**15,49**	0,0	44,0	1	4	**6,57**	0,441	0,684	0,417	0,708	14,9	**9,6**	15,8	**9,3**	0,0	
1,203	nach 7 Tagen 1,363 (49,5 %)	**13,90**	0,0	45,0	1/2	4	**6,70**	0,534	0,746	0,425	0,771	12,55	**8,69**	12,58	**8,87**	0,2	Kalkteig nach 7 Tagen 3 mm breite Risse.
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

4) Ermittelt durch Durchgießen des verdünnten Kalkteiges durch ein 120-Maschensieb und bezogen auf die Menge des ungelöschten Kalkes.
5) Abgesiebt auf dem 120-Maschensieb.
6) Ermittelt durch Absieben des Kalkpulvers auf dem 120-Maschensieb.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		14	15
		Analyse								Er-					
											Ablöschung				
Lfd. Nr. (Antrags-Nr.)	Herkunft oder Bezeichnung des Kalkes	Kieselsäure %	Tonerde und Eisenoxyd %	Kalk %	Magnesia %	Schwefelsäure %	Unaufgeschlossener Rückstand %	Glühverlust %	Rest (Alkalien) %	Gewicht für 1 l Stückkalk in Walnußgröße kg	Wasseranspruch %	Beginn des Löschens nach Minut.	Dauer des Löschens Minut.	Gewicht G des aus 5 kg Stückkalk gewonnenen Kalkteiges kg	Rauminhalt J des aus 5 kg Stückkalk gewonnenen Kalkteiges l
15 (3334)	Fettkalkteig Herkunft unbekannt	0,40 *1,12*	0,46 *1,29*	33.46 **94,10**	0,58 *1,63*	0,29 *0,82*	Hydratwasser 50,26 —	14.18 —	0,37 *1,04*	—	—	—	—	—	—
16 (3721)	Weißkalk aus Westfalen	1,15 *1,56*	0,57 *0,77*	70,92 **96,29**	0 90 *1,22*	0,30 *0,41*	Hydratwasser 57,29 —	26,35 —	— —	—	—	—	—	—	—
17 (3647)	Stückkalk Herkunft unbekannt	1,60 *1,73*	0,45 *0,49*	87,90 **95,08**	1.45 *1,57*	1,05 *1,14*	— —	8,03 —	— —	—	—	—	—	—	—
18 (3682)	Stückkalk Herkunft unbekannt	2,86 *3 04*	0,71 *0,75*	89.04 **94,58**	1,34 *1,42*	0,21 *0,22*	— —	5,86 —	— —	—	—	—	—	—	—
19 (3679)	Stückkalk aus Westfalen	1.20 *1,21*	0.51 *0,51*	97,82 **98,44**	0,25 *0,25*	0,10 *0,10*	— —	0,63 —	0,04 *0,04*	—	—	—	—	—	—
20 (162)	Gebrannter Stückkalk aus Schlesien	—	—	—	—	—	—	—	—	0,930	269	3	6	12,3	**9,6**
21 (247)	Marienhagener Kalk	—	—	—	—	—	—	—	—		300	—	7	20,1	16,8
		—	—	—	—	—	—	—	—		340	—	8	21,0	16,9
		—	—	—	—	—	—	—	—	0,752[1])	330	—	9½	20,5	16,7
		—	—	—	—	—	—	—	—		320	—	9	20,3	16,5
		—	—	—	—	—	—	—	—		330	—	10	20,6	16,5
22 (247)	Silesia-Kalk	—	—	—	—	—	—	—	—		300	—	7	19,0	15,7
		—	—	—	—	—	—	—	—		300	—	5½	18,9	15,0
		—	—	—	—	—	—	—	—	0,858[1])	290	—	4	18,4	14,5
		—	—	—	—	—	—	—	—		290	—	6	18,5	15,3
		—	—	—	—	—	—	—	—		310	—	5	19,4	15,8
23 (247)	Marienhagener Kalk	—	—	—	—	—	—	—	—		280	—	10	18,4	15,5
		—	—	—	—	—	—	—	—		290	—	8	19,0	15,8
		—	—	—	—	—	—	—	—	0,785[1])	300	—	8	19,4	16,2
		—	—	—	—	—	—	—	—		310	—	9	20,0	16,3
		—	—	—	—	—	—	—	—		320	—	7	20,6	17,8
24 (247)	Kalk vom Harz	—	—	—	—	—	—	—	—		240	—	6	15,6	11,7
		—	—	—	—	—	—	—	—		260	—	10	17,0	12,6
		—	—	—	—	—	—	—	—	0,825[1])	270	—	8	17,7	13,6
		—	—	—	—	—	—	—	—		275	—	7	18,0	13,8
		—	—	—	—	—	—	—	—		280	—	9	18,0	14,1
25 (247)	Marienhagener Kalk	—	—	—	—	—	—	—	—	—	220	—	6	15,4	11,9
		—	—	—	—	—	—	—	—	—	225	—	3	15,6	12,2
		—	—	—	—	—	—	—	—	—	230	—	5	16,1	12,4
		—	—	—	—	—	—	—	—	—	235	—	6	16,3	12,5
		—	—	—	—	—	—	—	—	—	240	—	5	16,4	12,6
		—	—	—	—	—	—	—	—	—	250	—	12	16,8	12,7

1) Festgestellt durch Einfüllen in das 10-Litergefäß.

16	17	18	19	20	21		22	23		24		25		26		27	28
giebigkeit																	Bemerkungen
zu Kalkteig				Ablöschung zu Kalkpulver													
Gewicht für 1 l Kalkteig		Rauminhalt d. Kalkteiges	Gehalt an steinigen Rückständen[3]	Wasseranspruch	Beginn des Löschens	Dauer des Löschens	Gewicht des Kalkpulvers aus 5 kg Stückkalk unabgesiebt G	Gewicht für 1 l Kalkpulver unabgesiebt		Gewicht für 1 l Kalkpulver abgesiebt[4]		Rauminhalt des Kalkpulvers aus 5 kg Stückkalk unabgesiebt		Rauminhalt des Kalkpulvers aus 5 kg Stückkalk abgesiebt		Gehalt an steinigen Rückständen	
R_r berechnet aus $\frac{G}{J}$	R_{r_1} ermittelt durch Einrütteln im Litergefäß[2]	berechnet aus $E = \frac{G}{R_{r_1}}$						R_f	R_r	R_f	R_r	$E_1 = \frac{G}{R_f}$	$E_2 = \frac{G}{R_r}$	$E_3 = \frac{G_1}{R_f}$	$E_4 = \frac{G_1}{R_r}$		
kg	kg	l	%	%	nach Minut.	Minut	kg	kg	kg	kg	kg	l	l	l	l	%[5]	
—	1,385	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,281	1,280 (57,0%)	**9,61**	2,2	30,0	sofort	4	**6,2**	0,508	0,791	—	—	12,2	**7,8**	—	—	2,7	Nach altem Verfahren abgelöscht. Glühverlust des Kalkpulvers 23,44%.
1,196	1,229	16,30	0,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	In der Mitte ein Krater mit einigen Rissen. Beschaffenheit ziemlich dünnflüssig.
1,243	1,217	16,60	0,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Sehr dünnflüssig.
1,228	1,224	16,40	0,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	desgl.
1,230	1,231	16,31	0,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Ziemlich dünnflüssig.
1,248	1,228	16,41	0,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Dünnflüssig; Wasser abgesetzt
1,210	1,234	15,40	2,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Nach 3 Tagen schwache Risse an den Kanten, etwas dünnflüssig.
1,226	1,225	15,42	6,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Sehr dünnflüssig.
1,269	1,222	15,05	10,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Etwas dünnflüssig.
1,210	1,240	14,93	5,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Sehr dünnflüssig.
1,226	1,220	15,90	6,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Nach 3 Tagen schwache Risse an den Kanten, etwas dünnflüssig.
1,187	1,253	14,68	0,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Viel verzweigte Risse.
1,203	1,244	15,29	0,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Einfacher Riß, 2 kleine Krater.
1,198	1,237	15,81	0,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Ohne Risse, 2 kleine Krater.
1,227	1,225	16,33	0,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Ohne Risse.
1,156	1,223	16,85	0,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Ein Krater und leichter Riß.
1,298	1,333	12,00	0,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	War nicht vollkommen ausgerührt.
1,275	1,348	13,32	0,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Einige Krater und feine Risse.
1,264	1,301	14,00	0,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Ohne Risse und Krater.
1,264	1,304	14,23	0,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Feucht an der Oberfläche.
1,255	1,277	14,34	0,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	" " " "
1,294	1,297	11,87	1,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Ohne Risse.
1,278	1,295	12,44	1,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Kleine Risse.
1,298	1,281	12,58	1,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	War nicht vollkommen ausgerührt, zeigte kurze breite Risse und Krater.
1,304	1,275	12,78	1,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Ohne Risse.
1,302	1,284	12,77	1,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	desgl.
1,323	1,265	13,26	6,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Löschte schwer ab, hatte zuviel Wasser erhalten.

2) Siehe Bem. 3 S. 4. — 3) Siehe Bem. 4 S. 5. — 4) Siehe Bem. 5 S. 5. — 5) Siehe Bem. 6 S. 5.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		14	15
		Analyse								Er-					
											Ablöschung				
Lfd. Nr. (Antrags-Nr.)	Herkunft oder Bezeichnung des Kalkes	Kieselsäure %	Tonerde und Eisenoxyd %	Kalk %	Magnesia %	Schwefelsäure %	Unaufgeschlossener Rückstand %	Glühverlust %	Rest (Alkalien) %	Gewicht für 1 l Stückkalk in Walnußgröße %	Wasseranspruch %	Beginn des Löschens nach Minut.	Dauer des Löschens Minut.	Gewicht G des aus 5 kg Stückkalk gewonnenen Kalkteiges kg	Rauminhalt J des aus 5 kg Stückkalk gewonnenen Kalkteiges l
26 (2305)	Stückkalk aus Niederschlesien	—	—	—	—	—	—	—	—	1,021	270	5	10	bestimmt 17,68	**13,95**
27 (2736)	Hochfeldener Weißkalk	—	—	—	—	—	—	—	—	0,892	230	9	14	bestimmt 16,1	**12,4**
28 (2709)	Fettkalk (vermutlich Rüdersdorfer)	—	—	—	—	—	—	—	—	1,136	—	—	—	—	—
29 (3011)	Weißkalk in Stücken aus Westfalen	—	—	—	—	—	—	—	—	1,016	232	14	21	bestimmt 14,85	**11,7**
30 (3217)	Hannoverscher Stückkalk, bezogen von den Berliner Mörtelwerken	—	—	—	—	—	—	—	—	0,946	240	9	16	bestimmt —	**12,8**
31 (3395 a)	Stückkalk aus Westfalen	—	—	—	—	—	—	—	—	0,810[1]	275	9	12	bestimmt 17.84	**14,4**
32 (3594)	Gebrannter Stückkalk aus Hannover	—	—	—	—	—	—	—	—	0,733	268	10	15	bestimmt 17,47	**14,0**
33 (4244)	Fettkalk aus Hochheim	—	—	—	—	—	—	—	—	0,724	238	15	21	bestimmt 16,4	**12,9**
34 (3908)	Muschelkalk vom Rhein	—	—	—	—	—	—	—	—	0,750	268	14	17	bestimmt 17,75	**14,0**
														Grau-	
1 (591)	Gebrannter Graukalk aus der Kylischen Gemeinde bei Sangershausen	8,86 *9,28*	4,94 *11,18*	77,76 **80,75**	1,37 *4,10*	0,44 *2,17*	2,12 —	3,96 —	0,56 —	0,950	213	3	6	15,3	**11,6**
2 (5168)	Graukalk aus Schlesien (Willmannsdorf)	4,68 *6,17*	2,45 *3,23*	67,48 **88,98**	0,68 *0,90*	0,10 *0,13*	— —	24,16 —	0,45 *0,59*	0,760	218	15	21	bestimmt 14,82	**11,85**
										Dolomitische					
1 (681)	Gebrannter dolomitischer Stückkalk aus Sachsen	2,34 *2,40*	7,24 *7,43*	54,87 **56,83**	32,74 *33,71*	0,31 *0,32*	— —	2,60 —	— —	0,970	129	90	210	bestimmt 12,3	**8,0**
3 (3616)	Kalk aus Thüringen	2,26 *2,97*	2,82 *3,71*	42,75 **56,23**	28,05 *36,89*	0,30 *0,39*	Hygroskop. Wasser 46,75 —	23,97 —	Spuren Spuren	0,727	162	54	105	bestimmt 12,39	**8,7**
3 (3610)	Kalk aus Reuß j. L.	0,68 *0,89*	3,80 *5,03*	48,40 **63,69**	22,03 *28,99*	0,41 *0,54*	— —	24,00 —	0,68 *0,89*	0,730	175	21	46	bestimmt 13,39	**9,4**

1) Festgestellt durch Einfüllen in das 10-Litergefäß.

16	17	18	19	20	21		22	23		24		25		26		27	28
giebigkeit zu Kalkteig				Ablöschung zu Kalkpulver													Bemerkungen
Gewicht für 1 l Kalkteig: R_r berechnet aus $\frac{G}{J}$	Gewicht für 1 l Kalkteig: R_{r_1} ermittelt durch Einrütteln im Litergefäß [2]	Rauminhalt d. Kalkteiges berechnet aus $E = \frac{G}{R_{r_1}}$	Gehalt an steinigen Rückständen [3]	Wasseranspruch	Beginn des Löschens nach Minut.	Dauer des Löschens Minut.	Gewicht des Kalkpulvers aus 5 kg Stückkalk unabgesiebt G	Gewicht für 1 l Kalkpulver unabgesiebt R_f	Gewicht für 1 l Kalkpulver unabgesiebt R_r	Gewicht für 1 l Kalkpulver abgesiebt [4] R_f	Gewicht für 1 l Kalkpulver abgesiebt [4] R_r	Rauminhalt des Kalkpulvers aus 5 kg Stückkalk unabgesiebt $E_1 = \frac{G}{R_f}$	unabgesiebt $E_2 = \frac{G}{R_r}$	abgesiebt $E_3 = \frac{G_1}{R_f}$	abgesiebt $E_4 = \frac{G_1}{R_r}$	Gehalt an steinigen Rückständen	
kg	kg	l	%	%			kg	kg	kg	kg	kg	l	l	l	l	% [5]	
nach 20 Tagen 1,268	1,287	**13.86**	3,5	50,0	1	4	**6,8**	0,449	0,657	—	—	15,1	**10.4**	—	—	4,5	Der Kalkteig hatte etwa 2 mm breite Risse.
nach 3 Tagen 1,298	1,295 (54,0 %)	**12,43**	0,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	38,0	1	5	**6,4**	0,587	0,843	0,473	0,776	10,9	**7,7**	13,5	**8,2**	4,0	Wahrscheinlich kein reinerFettkalk,sondern hydraul. Kalk.
nach 9 Tagen 1,269	1,289 (57,0 %)	**11,7**	Einige Stücke bis Erbsengröße	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Glühverlust des Kalkteiges 69,78%. Nach 9 Tag. hatte der Kalkteig etwa 3 mm breite Risse. 1 Lit. des 28 Tage alten Kalkteiges wog nach Absaugen des Wassers 1,298 kg.
nach 2 Tagen —	— (57,2 %)	—	0,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Nach 2 Tag. Lagern hatte der Kalkteig etwa 3 mm breite Risse. 1 Lit. des 28 Tage alten Kalkteiges wog nach Absaugen des Wassers 1,285 kg.
nach 7 Tagen 1,239	1,319 (54,0 %)	**12,83**	3,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Nach 2 Tagen hatte der Kalkteig etwa 2 mm breite Risse.
nach 7 Tagen 1,248	1,291 (56,3 %)	**13,53**	0.0	48,0	5	9	**6,57**	0,407	0,637	0,393	0,681	16,1	**10,3**	16,7	**9,6**	0,0	Nach 3 Tagen hatte der Kalkteig etwa 3 mm breite Risse.
nach 7 Tagen 1,271	1,295	**12,66**	0,0	47,0	2	9	**6,75**	0,432	0,686	0,394	0,689	15,6	**9,8**	16,8	**9,6**	2,42	Der Kalkteig wies 3-5 mm breite Risse auf. Glühverlust des Kalkpulvers 26,69 %, spez. Gewicht des Kalkpulvers 2,182.
nach 7 Tagen 1,268	1,302 (56,0 %)	**13,63**	1,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Kalkteig nach 7 Tagen etwa 2 mm breite Risse.

K a l k e.

16	17	18	19	20	21		22	23		24		25		26		27	28
1,319	1,322	**11,57**	2,8	52,0	2	3	**5,9**	0,394	0,679	—	—	15.0	**8,7**	—	—	3,5	Glühverlust des Kalkpulvers 16,62 %.
nach 7 Tagen 1,306	1,430 (46,6 %)	**10,86**	0,56	45,0	7	12	**6,58**	0,432	0,668	0,404	0,699	15,23	**9,85**	15,59	**9,01**	0,56	Kalkteig nach 7 Tagen 2 mm breite Risse.

K a l k e.

16	17	18	19	20	21		22	23		24		25		26		27	28
nach 10 Tagen 1,538	1,534 (36,2 %)	**6,60**	13,7	23,3	48	90	**6,1**	0,488	0,803	—	—	12,5	**7.6**	—	—	3,7	Glühverlust d. Kalkpulvers 18,68 %. Glühverlust bezogen auf den getrockn. Kalkteig 43,88 %.
nach 7 Tagen 1,424	1,471 (44,5 %)	**8,42**	0,5	50,0	44	94	**7,50**	0,467	0,700	0,463	0,737	16,1	**10,2**	—	—	0,7	Der Kalkteig hatte 3 bis 5 mm breite Risse.
nach 7 Tagen 1,424	1,405 (47,0 %)	**9,54**	1,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Nach 2 Tagen hatte der Kalkteig etwa 2 mm breite Risse.

2) Siehe Bem. 3 S. 4. — 3) Siehe Bem. 4 S. 5. — 4) Siehe Bem. 5 S. 5. — 5) Siehe Bem. 6 S. 5.

Angefügt sind die Ergebnisse der Prüfungen von sogenannten Graukalken und dolomitischen Kalken, die, als Luftkalkmörtel behandelt, die gleichen Erhärtungseigenschaften zeigen, wie die Luftkalke, jedoch infolge ihres geringeren Kalkgehaltes weniger ergiebig — wenigstens beim Ablöschen zu Kalkteig — sind, als diese.

Als Herkunft der Kalke ist nur die weitere Umgebung des Gewinnungsortes angegeben. Die Bedeutung der angegebenen Versuchsziffern ist aus dem Kopf der Tabelle ohne weiteres ersichtlich. Die für die Beurteilung der Kalkerzeugnisse wichtigsten Werte (Gehalt an Ätzkalk, Rauminhalt (l) der aus je 5 kg Stückkalk gewonnenen Kalkteig- und Kalkpulvermenge, letztere bezogen auf den eingerüttelten Zustand) sind durch fetten Druck hervorgehoben.

Mit Ausnahme der Kalke Nr. 1 und 20 sind sämtliche Kalke nach demselben Verfahren abgelöscht worden, so daß die Ergebnisse unmittelbar miteinander vergleichbar sind.

Auf Grund der Tabelle 1 lassen sich folgende Grenzwerte für die ermittelten Eigenschaften der 34 Luftkalke aufstellen:

Gehalt an den Einzelbestandteilen[1]
(im geglühten Zustande):

Kieselsäure	0,23	bis	6,16 %
Tonerde und Eisenoxyd	0,18	„	2,43 „
Ätzkalk	90,18	„	98,44 „
Magnesia	0,25	„	2,29 „
Schwefelsäureanhydrid	0,0	„	0,91 „
Rest (Alkalien usw.)	0,0	„	1,04 „

Wasseranspruch beim Ablöschen.

Kalkteig	230	bis	325 %
Kalkpulver	36,0	„	58,0 „

Raum-(Liter-)Gewicht für Kalkteig und Kalkpulver.

Kalkteig	berechnet aus $\frac{G}{J}$ (Spalte 16) Rr		1,203 bis 1,298 kg (**Mittel 1,248 kg**)
	nach dem Durchgießen durch das 120-Maschensieb und Absaugen bis auf etwa 50 % Wassergehalt R_{r_1}		1,269 bis 1,363 kg (**Mittel 1,318 kg**)
Kalkpulver	unabgesiebt	eingelaufen Rf	0,407 bis 0,534 kg (**Mittel 0,443 kg**)
		eingerüttelt R_r	0,637 bis 0,697 kg (**Mittel 0,675 kg**)
	abgesiebt	eingelaufen Rf	0,380 bis 0,485 kg (**Mittel 0,403 kg**)[2]
		eingerüttelt R_r	0,681 bis 0,771 kg (**Mittel 0,704 kg**)[2]

Ergiebigkeit (Kalkhydratmenge aus 5 kg Stückkalk).

Kalkteig	nach dem Gewicht		14,85 bis 20,56 kg (**Mittel 18,5 kg**)
	nach dem Raum-inhalt	bestimmt durch Messung	11,4 bis 17,75 l (**Mittel 14,5 l**)
		berechnet aus $\frac{G}{Rr}$	11,4 bis 15,49 l (**Mittel 13,2 l**)

---

[1]) Nicht mit in Betracht gezogen ist bei diesen Werten der Kalk Nr. 14 mit 86,52 % Ätzkalk und 6,93 % Magnesia.

[2]) Nicht mit in Betracht gezogen sind die Kalke Nr. 20, der nach einem alten Verfahren abgelöscht wurde, und der Kalk Nr. 28, der wahrscheinlich ein hydraulischer Kalk ist.

Kalkpulver	nach dem Gewicht			6,0 bis 7,08 kg (**Mittel 6,53 kg**)[1]
	nach dem Raum-inhalt	unabgesiebt	berechnet aus $\frac{G}{R_f}$	12,55 bis 16,1 l (**Mittel 14,91 l**[1])
			„ „ $\frac{G}{R_r}$	8,69 bis 10,8 l (**Mittel 9,72 l**)[1]
		abgesiebt	„ „ $\frac{G_1}{R_f}$	12,58 bis 17,3 l (**Mittel 9,35 l**)[1]
			„ „ $\frac{G_1}{R_r}$	8,2 bis 10,0 l (**Mittel 15,97 l**)[1]

Sieht man von dem Kalk Nr. 14 ab, der einen Gehalt von 86,52 % Ätzkalk aufweist, so kann man auf Grund der vorliegenden Ergebnisse in Übereinstimmung mit der von *Heusinger von Waldegg*[2]) aufgestellten Einordnung *solche Kalkerzeugnisse als Luftkalke ansehen, deren Ätzgehalt noch 90 v. H. beträgt.*

Bemerkenswert ist die aus der Zusammenstellung hervorgehende Tatsache, daß nicht, wie hätte erwartet werden sollen, Ätzkalk und Wasseranspruch bezw. Ergiebigkeit einander parallel laufen; wenigstens zeigt sich zwischen beiden Eigenschaften kein völlig gesetzmäßiger Zusammenhang.

Um übersichtlicher diese Beziehungen zwischen Ätzkalkgehalt und Ergiebigkeit zum Ausdruck zu bringen, sind die hierfür ermittelten Werte der Kalke, die auf beide Eigenschaften geprüft sind, in Tab. 1a, nach steigendem Ätzkalkgehalt geordnet, besonders zusammengestellt und die zugehörigen Raumgewichtswerte für Kalkteig und Kalkpulver beigefügt. Die festgestellten Mindest- und Höchstwerte für Ergiebigkeit und Raumgewicht der Luftkalke sind *fett* gedruckt.

Während man hätte annehmen sollen, daß der Ätzgehalt einen Maßstab für Ergiebigkeit liefert,

trifft dies nach der Zusammenstellung in Tabelle 1a nicht zu.

So hat z. B. Kalk Nr. 3 mit nur 92,01 % Kalkgehalt 300 % Wasseranspruch, während Kalk Nr. 13 mit 98,41 % Ätzkalk nur 289 % Wasseranspruch aufweist. Ferner hat Kalk Nr. 2 mit nur 90,98 % Ätzkalk 14,4 l Kalkteig ergeben, während der erheblich ätzkalkreichere Kalk Nr. 10 nur 14,1 l Kalkteig geliefert hat. Ähnlich sind die Beziehungen zwischen Kalkgehalt und Ergiebigkeit an Kalkpulver. Dagegen besteht — und das ist naturgemäß — ein gesetzmäßiger Zusammenhang zwischen Wasseranspruch und Ergiebigkeit.

Die Litergewichte der verschiedenen Kalke für Teig- und Pulverform weichen sehr voneinander ab, selbst auch bei sonst annähernd gleichem Wassergehalt. Näheres geht aus den vorangegebenen Mindest-, Höchst- und Durchnittswerten für die Litergewichte von Kalkteig und Kalkpulver hervor.

[1]) Nicht mit in Betracht gezogen sind die Kalke Nr. 20, der nach einem alten Verfahren abgelöscht wurde, und der Kalk Nr. 28, der wahrscheinlich ein hydraulischer Kalk ist.

[2]) *Heusinger von Waldegg*, Die Kalk- und Zementfabrikation. 1875. S. 112.

Tab. 1a. **Kalkgehalt, Wasseranspruch, Ergiebigkeit und Raumgewicht nach Tab. 1.**

Nr. (Lfd.Nr. der Tab. 1)	Herkunft des Kalkes	Gehalt an Ätzkalk	5 kg Stückkalk ergaben							Gewicht in kg für 1 Liter					
			Wasser-anspruch	Kalkteig		Wasser-anspruch	Kalkpulver			Kalkteig		Kalkpulver			
				G	J		ungesiebt G	ungesiebt	gesiebt	berechnet aus G/J	bis auf etwa 50% Wasser abgesaugt	ungesiebt		gesiebt	
								berechnet aus G/R_r				R_f	R_r	R_f	R_r
		%	%	kg	l	%	kg	l	l						
							Luft (Weiße) Kalke.								
1 (1)	Schlesien	90,18	**206**	12,6	**9,3**	39,5	7,0	9,9	—	1,255	1,360	0,430	0,675	—	—
2 (4)	Harz	90,98	268	17,82	14,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3 (7)	Rheinland	92,01	300	19,05	15,60	54,0	6,70	10,35	9,7	1,221	1,309	0,439	**0,647**	0,397	0,690
4 (5)	Westfalen	94,60	230	15,0	11,4	—	—	—	—	1,226	1,316	—	—	—	—
5 (9)	"	95,98	300	20,43	16,2	**58,0**	6,92	—	—	1,263	**1,282**	—	—	—	—
6 (8)	"	96,92	275	17,65	14,5	46,6	6,46	9,8	9,6	1,217	1,316	**0,422**	0,662	**0,380**	**0,673**
7 (13)	Mähren	97,19	302	18,95	15,75	45,0	6,70	8,87	8,69	**1,203**	**1,363**	**5,534**	**0,746**	**0,425**	**0,771**
8 (6)	Sachsen	97,20	282	18,3	14,9	55,0	7,08	**10,8**	10,0	1,228	1,314	0,448	0,658	0,409	0,707
9 (12)	Mähren	97,53	**325**	20,56	**16,75**	44,0	6,57	9,6	9,3	1,227	1,305	0,441	0,684	0,417	0,708
10 (2)	Harz	97,83	278	17,3	14,1	38,0	6,4	9,5	—	1,227	1,315	0,434	0,679	—	—
11 (3)	Schlesien	98,12	260	16,5	13,0	44,4	6,0	9,3	—	1,269	1,322	0,433	0,649	—	—
12 (10)	Mähren	98,29	310	19,94	15,50	36,4	6,31	9,1	8,8	**1,286**	1,359	0,441	0,697	0,409	0,717
13 (11)	"	98,41	289	19,23	15,50	**36,0**	6,13	8,8	8,7	1,241	1,335	0,441	0,694	0,400	0,702
							Graukalke.								
14 (1)	Thüringen	80,75	213	15,3	11,6	52,0	5,9	8,7	—	1,319	1,322	0,394	0,679	—	—
15 (2)	Schlesien	88,98	218	14,82	11,35	45,0	6,58	9,85	9,01	1,306	1,430	0,432	0,668	0,404	0,699
							Dolomitische Kalke.								
16 (2)	Thüringen	56,23	162	12,19	8,7	50,0	7,50	10,2	—	1,424	1,471	0,467	0,700	0,463	0,737
17 (1)	Sachsen	56,30	129	12,3	8,0	23,3	6,1	7,6	—	1,538	1,534	0,488	0,803	—	—
18 (3)	Reuß	63,69	175	13,39	9,4	—	—	—	—	1,424	1,405	—	—	—	—

Durch das Absieben des Kalkpulvers (auf dem 120-Maschensieb) wird dessen Litergewicht merklich verändert. Während sich hierdurch das Raumgewicht im eingelaufenen Zustande im Vergleich zu dem im ungesiebten Zustande verringert, wird das des fest eingerüttelten Kalkpulvers erhöht.

Einfluß der Art des Ablöschens (Menge des Ablöschwassers) auf die Erhärtungsfähigkeit von Luftkalk. Die erwähnte Anschauung, daß die Verwendung zu großer Wassermenge beim Ablöschen ein schlechtes Löschprodukt ergeben soll, trifft in dieser Allgemeinheit nicht zu. Schon Michaelis tritt dieser Ansicht entgegen. Nach seinen Beobachtungen bildet sich, wenigstens bei gut löschenden Kalken, nur langsamer ein ebenso vollkommener Kalkbrei. Versuche mit einem Kalk, der nach verschiedenen Verfahren abgelöscht wurde, haben die Richtigkeit der Michaelisschen Anschauung bestätigt. Der zu diesen Versuchen benutzte Kalk, der aus einem Kalkwerk stammte, das nachweislich Luftkalk erzeugt, wurde nach drei verschiedenen Verfahren abgelöscht, und zwar:

1. durch Zusetzen des Ablöschwassers in Teilmengen unter beständigem Rühren beim Ablöschen;
2. durch Zusetzen des gesamten Ablöschwassers ohne Rühren beim Ablöschen;
3. durch Eintauchen der gesamten Kalkmenge in einen Überschuß von Wasser[1]) nach Vorschlag Martens.

Aus den gewonnenen Kalkteigen wurden in Verbindung mit Mauersand Mörtel im Verhältnis von 1:3 nach Gewichtssteilen hergestellt, nachdem der nach Vorschlag Martens abgelöschte Kalk durch Absaugen des überschüssigen Wassers annähernd auf die praktisch übliche Steife der beiden anderen Kalkteige gebracht worden war. Die Mörtel wurden von Hand mit der Kelle solange gemischt, bis eine gleichmäßige (erdfeuchte) Masse entstand, und aus ihnen Zug- und Druckproben durch Einschlagen auf dem Hammerapparat hergestellt.

Tab. 2. **Einfluß der Art des Ablöschens auf die Erhärtungsfähigkeit von Luftkalk.**

Ergebnisse der Festigkeitsprüfungen mit Mörtel aus 1 Gewichtsteil Kalkteig[2]) + 3 Gewichtsteilen Mauersand. (Mittelwerte aus je 10 Einzelversuchen.)

Art der Ablöschung	Zugfestigkeit in kg/qcm nach			Druckfestigkeit in kg/qcm nach			Verhältnis Zug : Druck für		
	28 Tagen	3 Monaten	1 Jahr	28 Tagen	3 Monaten	1 Jahr	28 Tage	3 Monate	1 Jahr
Zusetzen des Löschwassers in Teilmengen unter beständigem Rühren der Löschmasse beim Ablöschen (altes Verfahren)	5,0	5,4	5,5	22,2	29,2	28,1	1/4,4	1/5,4	1/5,1
Zusetzen des gesamten Löschwassers auf einmal ohne Rühren beim Ablöschen	4,7	4,4	5,1	21,8	25,2	26,0	1/4,6	1/5,7	1/5,1
Ablöschung in einer großen Wassermenge (Vorschlag Martens)	5,6	5,8	5,3	25,8	30,2	32,1	1/4,6	1/5,2	1/6,1

1) Der Wasserzusatz betrug 800 %, während er sonst im Mittel höchstens 300% beträgt.

2) Gewonnen aus sogenanntem Hannöverschen Kalk.

Die Körper lagerten im Zimmer an der Luft und wurden bei 28, 90 Tagen und 1 Jahr Alter auf Festigkeit geprüft.

> Aus den Ergebnissen dieser Versuche (Tabelle 2) geht hervor, daß die Art des Ablöschens ohne Einfluß auf die Güte und Erhärtungsfähigkeit des Kalkes gewesen ist. Der mit einem Überschuß an Wasser abgelöschte Kalk hat sogar etwas höhere Festigkeiten ergeben, als die nach den beiden anderen Verfahren abgelöschten.

Das Ablöschen zu Kalkteig und die damit Hand in Hand gehende Bestimmung der Ergiebigkeit erfolgt bis jetzt in der Weise, daß in zwei mit Zinkblech ausgeschlagene Holzkästen von 31,7 × 31,7 × 40 cm je 5 kg Kalk in Stücken bis etwa Walnußgröße eingeschüttet, auf dem Boden gleichmäßig verteilt und zunächst mit soviel Wasser von 20 C⁰ Wärme übergossen werden, daß die Kalkstücke eben bedeckt sind. Nach Eintritt des Löschbeginns, der sich durch je nach der Frische und Reinheit des Kalkes mehr oder minder lebhaftes Kochen der fortwährend durchgerührten Masse bemerkbar macht, wird weiteres Wasser in kleinen Mengen solange zugesetzt, bis der Löschvorgang beendet ist, bezw. die Löschmasse eine breiartige Steife erlangt hat. Die aufgewendete Wassermenge, die Zeit des Beginns des Versuchs, des Eintritts des Löschens und die Dauer desselben werden vermerkt. Nach mehrtägigem Stehen der Ablöschkästen im Laboratorium oder nach Auftreten von Rissen im Kalkteig werden das Gewicht und der Rauminhalt des gewonnenen Kalkteiges bestimmt. Hierauf wird der Kalkteig durch Zugießen von Wasser soweit verdünnt, daß er durch das 120-Maschensieb geschickt werden kann und darauf wird der verbleibende Rückstand an steinigen Bestandteilen (Krebsen) ermittelt. Ferner werden das Litergewicht des Kalkteiges, berechnet aus dem vorher bestimmten Gewicht und Rauminhalt der gesamten Kalkteigmenge, und das Litergewicht des bis auf etwa 50 % Wassergehalt wieder abgesaugten Kalkteigs im eingerüttelten Zustande bestimmt.

Auf Grund von Versuchen, die, veranlaßt durch die Sektion Kalk, von dem Amt gemeinsam mit einem für diesen Zweck eingesetzten Ausschuß ausgeführt worden sind, ist neuerdings folgendes Verfahren für die Bestimmung der Ergiebigkeit von Luftkalk vereinbart worden.

Je 5 kg zerkleinerter Ätzkalk, der durch ein Drahtsieb von 2,5 cm Maschenweite völlig hindurchgeht und auf einem Drahtsieb von 0,7 cm Maschenweite liegen bleibt, werden in Kalklöschkästen von 31,7 cm Länge, 31,7 cm Breite und 40 cm Höhe (Innenmaß) zunächst mit 6 l Wasser von 20 C⁰ übergossen. Sobald das Löschen (Kochen) beginnt, werden nach und nach unter beständigem Rühren der Masse mit dem Löschspaten von 12 cm Breite und 25 cm Länge noch 10 l Wasser derart zugegeben, daß die Masse möglichst im Kochen bleibt und das kalte Wasser nicht unmittelbar mit dem ungelöschten Kalk in Berührung kommt. Zwei Stunden nach Beendigung des Löschens wird der Kalkbrei nochmals durchgerührt und durch ein Sieb mit 120 Maschen auf 1 qcm in einen gewogenen zweiten Löschkasten gegossen. Dabei darf das Sieb nur gerüttelt werden. Um diese Arbeit zu erleichtern, wird ein quadratisches Sieb in einem Holzrahmen von 21 cm innerer Seitenlänge und 11 cm Höhe mit Handgriffen und Deckel verwendet. Es ruht auf zwei gekröpften Leisten aus verzinktem Eisen, die auf dem Löschkasten festgeschraubt werden. Der Rest des Kalkbreies aus dem ersten Kasten wird mit dem Pinsel zusammengestrichen. Die Menge der ungelöscht gebliebenen Bestandteile wird nach dem Trocknen ermittelt; die Krebse werden auf Zerfallen bei Benetzung mit Wasser geprüft.

Nach 20stündigem Stehen wird das Gewicht des Kalkbreies bestimmt. Nach Durchrühren des Breies wird fünfmal je 1 l des Breies mit dem Normal-Litermaße abgemessen, gewogen und in den kugelig gestalteten Filterbeutel gefüllt, nachdem dieser zunächst genäßt, ausgepreßt und gewogen worden ist. Das Ergebnis der Raumgewichtsbestimmung und das Gesamtgewicht des Beutels mit Füllung werden vermerkt. Der gefüllte Beutel wird zugebunden und mit der Mündung nach oben drei Stunden lang zwischen ebenen Metallplatten mit 100 kg belastet. Nach der Pressung wird der Beutel mit dem Kalk gewogen und von dem gefundenen Wert das vorher ermittelte Gewicht des leeren Beutels abgezogen. Von dem gepreßten Brei wird das Litergewicht in gerütteltem Zustande bestimmt, ferner an etwa 50 g Brei der Trockenverlust auf dem Wasserbad und an etwa 2 g des aus dem Kalkbrei gewonnenen trockenen Kalkhydrats der Gehalt an Hydratwasser. Man erhält folgende Werte:

Gewicht von 10 l Stückkalk in kg.
Dauer des Löschversuches.
Rückstand auf dem 120 Maschensieb in kg und Gewichtsprozent.
Gesamtgewicht des gesiebten Kalkbreies $= G$ in kg.
Gewicht von 1 l Kalkbrei eingefüllt $= R_k$ in kg.
Gewicht von 5 l Kalkbrei vor dem Pressen $= G_{vp}$ in kg.
Gewicht von 5 l Kalkbrei nach dem Pressen $= G_{np}$ in kg.
Gewicht von 1 l gepreßtem Kalk (eingerüttelt) $= R_p$ in kg.
Ausbeute an Preßteig von 5 kg Stückkalk in Litern $= \frac{G_{np} \times G}{G_{vp} \times R_p}$ in l.
Trockenverlust des Kalkbreies auf dem Wasserbad.
Hydratwasser des Trockenkalkes.

Weniger gebräuchlich als die Ablöschung zu Kalkteig ist das Ablöschen von Luftkalk zu Kalkpulver. Zu diesem Zwecke werden im Amt die kleingeschlagenen Kalkstücke in einem Drahtkorbe solange in Wasser getaucht, bis sie soviel Wasser aufgenommen haben, als sie aufzusaugen vermögen. Dieser Augenblick gilt als eingetreten, wenn die beim Eintauchen erfolgende Blasenbildung aufgehört hat. Der Kalk wird dann in die Ablöschkästen geschüttet, in denen er sich unter starker Erhitzung aufbläht, rissig wird und schließlich zu feinem Pulver zerfällt.

Dieses Verfahren der Ablöschung wird von Praktikern nicht empfohlen, weil der Kalk leicht zu wenig Wasser erhält und das Gedeihen hierdurch beeinträchtigt wird. Die Maurer nennen solchen mit ungenügenden Wassermengen gelöschten Kalk „verbrannt". Es steht indessen wohl außer Zweifel, daß gut zu Pulver abgelöschtes Kalkhydrat ebensogut erhärtet, wie zu Kalkteig abgelöschtes, *vorausgesetzt, daß die Ablöschung vollkommen ist.* Ungelöscht gebliebene Stücke sind entweder auf einem genügend feinen Siebe auszuhalten oder aufs feinste zu zerkleinern, um die schädigende Wirkung des Nachlöschens zu verhindern.

Der Kalk löscht nicht immer gleichmäßig ab. Einzelne („träge") Teile löschen erst allmählich nach, die, wenn man den Kalk zu früh zum Vermauern oder Putzen verwendet, zu Treiberscheinungen im Mörtel Veranlassung geben würden. Namentlich tonhaltige, etwas zu stark gebrannte Stücke zeigen diese Eigenschaft des Nachlöschens, das manchmal oder vielmehr meist erst nach längerer Zeit sich bemerkbar macht. Die damit verbundene Raumvergrößerung ist erheblich, weil der freiwillige Zerfall an der Luft langsam, aber um so energischer vor sich geht. Man läßt daher den Kalkteig, um wenigstens dem größten Teil

etwa noch nicht gelöschter Stücke Gelegenheit zum Nachlöschen zu geben, längere Zeit lagern, gewöhnlich in besonders hierzu hergestellten Löschgruben. Durch dieses „Einsumpfen“ soll der Kalkbrei verbessert werden, und zwar um so mehr, je länger er lagert.

Einfluß der Dauer des Einsumpfens auf die Erhärtungsfähigkeit. Um den Einfluß der Dauer des Lagerns (Einsumpfens) auf die Güte des Kalkteiges festzustellen, wurde Stückkalk, der als Mauerkalk eingereicht war, zu Kalkteig abgelöscht und nach verschieden langen Lagerzeiten mit dem gleichen Sande (Normalsand) zu Mörtel verarbeitet. Die Lagerzeiten betrugen 24 Stunden, 3, 7, 14, 28 Tage und 3 Monate. Aus den Mörteln wurden jeweilig je 20 Zug- und Druckproben durch Einschlagen auf dem Hammerapparat hergestellt. Die mit 28 und 90 Tage alten Probekörpern angestellten Festigkeitsversuche lieferten die in Tab. 4 enthaltenen Ergebnisse. In Tab. 3 sind die Eigenschaften des verwendeten Kalkes verzeichnet.

Tab. 3. Einfluß der Dauer der Lagerung des Kalkteiges auf die Festigkeit des Mörtels.

Eigenschaften des Kalkes (Mauerkalk).

Mittleres Gewicht für 1 l Stückkalk in Walnußgröße	Wasserzusatz zum Ablöschen in Kalkteig	Löschbeginn nach	Dauer der Ablöschung	5 kg Stückkalk ergaben im Mittel Kalkteig [1]		Wasserverlust im Mittel	Gehalt an steinigen Rückständen	Mittleres Litergewicht des Kalkteiges in kg nach einer Lagerung [2]) von					
								24 Stunden	3 Tagen	7 Tagen	14 Tagen	28 Tagen	90 Tagen
kg	%	Min.	Min.	kg	l	kg	%						
1,060	280	10	15	17,7	14,8	1,33	0,4	1,268	1,268	1,269	1,289	1,299	1,322

1) Nach einem Tage Lagerung gemessen.
2) Der Kalkteig lagerte in einer zugedeckten Tonne.

Tab. 4. Ergebnisse der Festigkeitsversuche mit Mörtel aus 1 Raumteil Kalkteig und 3 Raumteilen Normalsand[3]).

Mittelwerte aus je 10 Einzelversuchen.

Dauer der Lagerung des Kalkteiges	24 Stunden		3 Tage		7 Tage		14 Tage		28 Tage		3 Monate	
Alter der Probekörper	28 Tage	90 Tage	28 Tage	90 Tage	28 Tage	90 Tage	28 Tage	90 Tage	28 Tage	90 Tage	28 Tage	90 Tage
Mittlere Zugfestigkeit in kg/qcm	1,8	2,1	1,3	1,4	1,8	1,6	1,8	2,1	1,8	1,9	1,3	2,1
Mittlere Druckfestigkeit in kg/qcm	6,6	8,3	5,8	7,5	6,1	7,6	8,3	9,3	7,7	9,2	6,4	9,2

3) Litergewicht eingelaufen; 1,415 kg; eingerüttelt: 1,695 kg; im Mittel: 1,555 kg.

Aus dem Vergleich der Festigkeitswerte ist ersichtlich,

daß die Dauer der Lagerung ohne erkennbaren Einfluß auf die spätere Erhärtungsfähigkeit der aus dem verschieden alten Kalkteig hergestellten Mörtel ist. Eine Verbesserung des Kalkbreies wird also, entgegen der allgemeinen Anschauung, durch längeres Einsumpfen nicht bewirkt. Im Interesse größerer Sicherheit ist jedoch, namentlich wenn der Kalk zur Bereitung von Putzmörtel verwendet werden soll, das Einsumpfen zu empfehlen, vor allen Dingen aber die Aushaltung gröberer ungelöschter Stücke bei dem Einlassen der Löschmasse in die Löschgruben.

Der Kalk muß während des Lagerns vor Luftzutritt, d. h. Kohlensäureaufnahme geschützt bleiben.

Eigenfestigkeit des Kalkhydrates. Zu den Materialeigenschaften des Kalkes, die die spätere Festigkeit des daraus in Verbindung mit Sand hergestellten Mörtels beeinflussen, gehört die Selbsterhärtungsfähigkeit, d. h. die Eigenfestigkeit des abgelöschten Kalkes, des Kalkhydrats. Über diese Eigenschaft herrscht bis jetzt völlige Ungewißheit, da Versuche zu deren Ermittelung meines Wissens noch nicht angestellt worden sind. In der Literatur habe ich vergeblich danach gesucht. Die Gründe für die Unterlassung solcher Versuche ergeben sich wohl aus einer Äußerung Feichtingers[1]) über die Erhärtungsfähigkeit von Kalkhydrat; er sagt:

„Der reine Kalkbrei, an der Luft sich selbst überlassen, erhärtet ebenfalls unter Abgabe von Wasser und Aufnahme von Kohlensäure, aber derselbe schwindet sehr stark, bekommt viel Risse und zerklüftet sich sehr."

Die ersten im Materialprüfungsamt ausgeführten Versuche zur Feststellung der Eigenfestigkeit schlugen fehl. Das Einfüllen von Kalkteig in die Formen versagte. Der in die Formen gefüllte und gerüttelte Kalkteig blieb sehr lange Zeit plastisch; die Körper konnten deshalb nicht entformt werden. Als man den Versuch auf absaugenden Unterlagen (Gipsplatten) wiederholte, gab der Kalkteig zwar sein Wasser schneller, aber ungleichmäßig ab; die Körper wurden stark schwindrissig.

Auch als statt des Kalkteiges Kalkhydrat in Pulverform benutzt wurde, indem das Kalkpulver zum Zweck des Einschlagens wie bei der Prüfung von reinem Zement mit soviel Wasser angemacht wurde, daß eine erdfeuchte Masse entstand, hatte man Mißerfolg. Die eingestampfte erdfeuchte Kalkmasse blieb an den Seitenflächen fest haften, auch wenn die Formen geölt, mit Paraffin überzogen, trocken oder glatt poliert waren. In allen Fällen haftete die Kalkmasse so fest an den Formflächen, daß ihre Entfernung nicht möglich war. Erst durch folgendes Verfahren gelang es mir, brauchbare Probekörper zu erzielen:

Pausleinewandstreifen wurden so an die Seitenwandungen der Form gelegt, daß sie unten und oben um ein weniges über die Form hinausragten und an den Innenflächen der Form fest anlagen. Hierauf wurde der Aufsatzkasten aufgesetzt und das Ganze in den Hammerapparat so eingespannt, daß beim Einstampfen der eingefüllten Kalkmasse die Leinewand nicht zerknittert werden konnte. Das Kalkhydratpulver wurde mit soviel Wasser angemacht, daß eine erdfeuchte Masse entstand; diese wurde mit der Kelle gut durchgearbeitet, in die Form eingefüllt und von Hand mit kleinen Stampfern eingestampft, weil das Einschlagen mit dem Hammer versagte, da der oberste Teil des Körpers nach Fertigstellung schalenförmig abblätterte.

[1]) Feichtinger, Die chemische Technologie der Mörtelmaterialien. 1885. S. 67.

Auffallend ist der hohe, zum Anmachen (erdfeucht) erforderliche Wasseranspruch, der nach den Ergebnissen der Vorproben zwischen 45 und 48 % schwankte. (Portlandzemente beanspruchen zur Erlangung der gleichen erdfeuchten Steife nur 16—18 %).

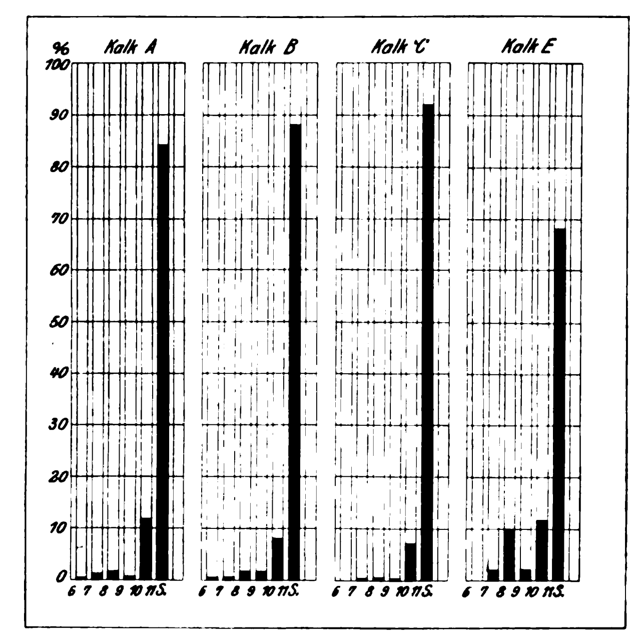


Fig. 1[1]).
Darstellung der Siebrückstände zwischen je zwei Sieben.
(Nach Tab. 7.)

Zur Prüfung gelangten sechs Kalke, die, wie die Analysen (Tab. 5) zeigen, sämtlich reine Luftkalke waren; ihr Ätzkalkgehalt schwankte zwischen rund 95 und 98 %. Die Kalke wurden wie üblich zu Kalkpulver abgelöscht. Das Ergebnis der Ablöschversuche ist in Tabelle 6 verzeichnet. Nach mehrtägigem Lagern wurde das Pulver auf dem 120 Maschen-Siebe abgesiebt; der Rückstand wurde ausgehalten, das Durchgehende zur Herstellung der Probekörper benutzt. Litergewicht und Korngröße der Kalkhydratpulver aus Kalk A, B, C, E und F sind aus Tab. 7 ersichtlich, die Kornzusammensetzung außerdem aus Fig. 1. Der Wasserzusatz betrug bei vier Kalken 47,0 %, bei einem 45,0 % und bei einem 38,5 %.

Tab. 5. **Chemische Zusammensetzung der Kalke.**

Die in Klammern ( ) stehenden Zahlen bedeuten die Werte, bezogen auf den geglühten Zustand.

Herkunft des Kalkes	Kieselsäure %	Eisenoxyd und Tonerde %	Kalk %	Magnesia %	Schwefelsäureanhydrid %	Unaufgeschlossener Rückstand %	Glühverlust %	Rest (Alkalien usw.) %
A	1,04 (1,49)	0,70 (1,00)	67,94 (97,20)	0,28 (0,38)	0,02 (0,03)	— —	30,10 —	Spuren
C	1,19 (1,20)	0,51 (0,51)	97,20 (97,82)	0,25 (0,25)	0,18 (0,18)	— —	0,63 —	0,04 (0,04)

[1]) In diesem und allen folgenden Schaubildern, die die Ergebnisse von Siebversuchen (Siebrückstände) darstellen, bedeuten die

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	S
die Siebe mit	1,5 cm Maschenweite	1 Masche	4	9	20	60	120	324	600	900	5000	Durchgang durch das feinste angewendete Sieb (Siebfeinstes).

(Nr. 3–11: Maschen; Nr. 2–5: auf 1 qcm)

Tabelle 5. (Fortsetzung.)

Herkunft des Kalkes	Kieselsäure %	Eisenoxyd und Tonerde %	Kalk %	Magnesia %	Schwefelsäureanhydrid %	Unaufgeschlossener Rückstand %	Glühverlust %	Rest (Alkalien usw.) %
D	2,22 (2,25)	1,48 (1,50)	93,43 (94,60)	0,81 (0,82)	0,03 (0,03)	— —	1,24 —	0,79 (0,80)
E	0,04 (0,28)	1,80 (2,43)	70,94 (95,98)	1,06 (1,14)	— —	— —	26,08 —	0,08 (0,17)
F	0,73 (0,97)	0,40 (0,53)	73,04 (96,92)	0,70 (0,93)	0,50 (0,66)	— —	24,99 —	— —

Erhärtung von reinem Kalk (Kalkhydrat).

Tab. 6. Ablöschung, Wasseranspruch und Ergiebigkeit der zur Prüfung verwendeten Kalke.

Herkunft des Kalkes	Gewicht für 1 l Stückkalk in Walnußgröße	Ablöschung zu Kalkteig							Ablöschung zu Kalkpulver							
		Wasseranspruch	Beginn des Löschens nach Min.	Dauer des Löschens Min.	5 kg Stückkalk ergaben an Kalkteig		1 l Kalkteig wog		Wasseranspruch	Beginn des Löschens nach Min.	Dauer des Löschens Min.	5 kg Stückkalk ergaben an Kalkpulver (ungesiebt)	1 l Kalkpulver[2]) wog (ungesiebt)		Rauminhalt[2]) des Kalkpulvers aus 5 kg Kalk	
					G	J	berechnet aus $\frac{J}{G}$	im Litergefäß eingerüttelt					eingelaufen R_f	eingerüttelt R_r	$\frac{G}{R_f}$	$\frac{G}{R_r}$
	kg	%			kg	l	kg	kg	%			(G) kg	kg	kg	l	l
A. Thüringen	0,599	282,0	5	8	18,30	14,9	1,228	1,314 55,9 % [1])	55,0	1	3	7,08	0,448 *0,409*	0,658 *0,707*	15,8 *17,3*	10,8 *10,0*
B. Westfalen	0,733	276,6	10	15	17,47	14,0	1,248	1,291 56,3 % [1])	48,0	5	9	6,57	0,407 *0,393*	0,637 *0,681*	16,1 *16,7*	10,3 *9,6*
C. Westfalen	0,729	274,0	11	18	17,19	13,3	1,292	1,352 55 % [1])	48,0	5	9	6,44	— *0,419*	— *0,702*	— *13,0*	— *9,2*
D. Westfalen	1,070	230,0	4	9	15,1	11,4	1,316	1,310 57,5 % [1])	—	—	—	—	—	—	—	—
E. Westfalen	0,953	300,0	1	5	20,43	16,2	1,261	1,282 55,2 % [1])	58,0	0	2	6,92	— *0,413*	— *0,687*	— *16,7*	— *10,1*
F. Westfalen	0,748	275,0	7	12	17,65	14,5	1,217	1,316 54,6 % [1])	46,6	1	4	6,46	0,422 *0,380*	0,662 *0,763*	15,3 *17,0*	9,8 *9,6*

1) Wassergehalt des Kalkteiges.

2) Die liegend gedruckten Zahlen beziehen sich auf das auf dem 120-Maschensieb abgesiebte Kalkpulver.

Tab. 7. Gewicht und Korngröße des aus den Kalken gewonnenen Kalkhydratpulvers.

(Auf dem 120-Maschensieb abgesiebt.)

Kalk	Gewicht für 1 l Kalkpulver eingelaufen R_f kg	Gewicht für 1 l Kalkpulver eingerüttelt R_r kg	Korngröße: Rückstand %	Siebe mit der übergeschriebenen Anzahl Maschen auf 1 qcm: —	120	240	324	600	900	5000	S[1]
A	0,409	0,707	Auf den Sieben	—	0,0	0,4	1,6	3,4	4,0	16,0	—
			Zwischen je 2 Sieben		0,0	0,4	1,2	1,8	0,6	12,0	84,0
B	0,393	0,681	Auf den Sieben	—	0,0	0,4	0,8	2,4	4,0	12,0	—
			Zwischen je 2 Sieben		0,0	0,4	0,4	1,6	1,6	8,0	88,0
C	0,419	0,702	Auf den Sieben	—	—	0,0	0,2	0,6	0,8	8,0	—
			Zwischen je 2 Sieben		—	0,0	0,2	0,4	0,2	7,2	92,0
E	0,413	0,687	Auf den Sieben	—	0,0	6,0	8,0	18,0	20,0	32,0	—
			Zwischen je 2 Sieben		0,0	6,0	2,0	10,0	2,0	12,0	68,0
F	0,380	0,763	Auf den Sieben	—	—	—	—	—	—	—	—
			Zwischen je 2 Sieben		—	—	—	—	—	—	—

[1]) Siebfeinstes, das durch das 5000-Maschensieb hindurchgegangen ist.

Tab. 8. Raumgewicht der Probekörper zu Tab. 9.

Mittelwerte aus je fünf Einzelversuchen.

Kalk	Zugproben Normalformat; Rauminhalt = 70 ccm.					Druckproben Würfel von 7,1 cm Kantenlänge; Rauminhalt = 355 ccm				
	Raumgewicht in g/ccm nach									
	3 Tagen	28 Tagen	3 Monaten	6 Monaten	1 Jahr	3 Tagen	28 Tagen	3 Monaten	6 Monaten	1 Jahr
A	1,086	1,014	1,057	1,057	—	1,211	0,930	0,992	1,017	—
B	0,943	0,986	1,029	1,029	—	1,130	0,959	1,003	1,042	—
C	1,029	1,043	1,057	1,057	—	1,127	0,938	0,977	0,994	—
D	—	—	—	—	—	1,290	1,011	1,087	1,082	1,104
E	1,000	1,000	1,086	1,129	—	1,177	0,930	0,989	1,054	—
F	0,943	0,900	0,943	0,943	0,971	1,099	0,856	0,910	0,935	0,963

Drei Kalke wurden bei 28 Tagen, 3 und 6 Monaten und drei Kalke außerdem noch bei 1 Jahr Alter geprüft. Die Ergebnisse der Gewichts- bezw. Raumgewichtsbestimmungen der Festigkeitsprobekörper sind in Tab. 8, die der Zug- und Druckfestigkeitsversuche in Tab. 9 zusammengefaßt. Außerdem ist der Erhärtungsverlauf in Fig. 2 dargestellt.

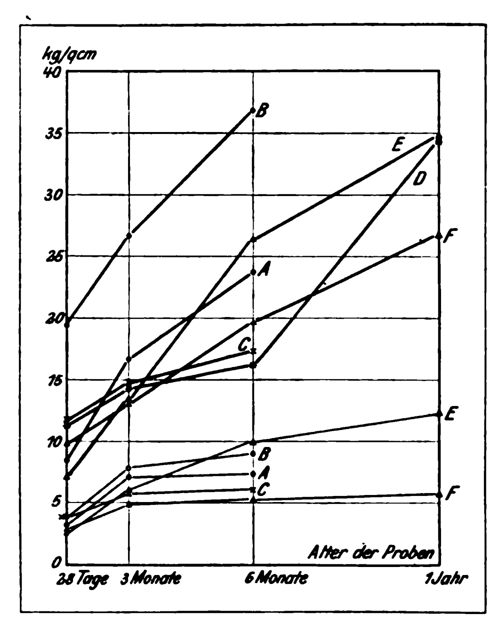


Fig. 2.
Eigenfestigkeit (Erhärtungsfortschritt) von Kalkhydrat aus Luftkalk.
(Mittelwerte nach Tab. 9).

——— Zug- / ━━━ Druck- } Festigkeit von Kalk A bis F.

Tab. 9. **Zug- und Druckfestigkeit von Körpern aus reinem Kalkhydrat.**

Herkunft des Kalkes (Wasserzusatz)	Versuch Nr.	Zugfestigkeit in kg/qcm nach				Druckfestigkeit in kg/qcm nach			
		28 Tagen	3 Monaten	6 Monaten	1 Jahr	28 Tagen	3 Monaten	6 Monaten	1 Jahr
A	1	2,8	7,1	10,1	—	8,8	19,2	29,5	—
	2	2,1	6,7	6,9	—	8,6	15,4	22,8	—
Thüringen	3	3,3	8,6	6,7	—	6,8	18,2	23,0	—
	4	3,6	7,1	7,0	—	9,2	15,5	19,2	—
(47,0 %)	5	3,8	5,6	5,7	—	8,6	14,6	23,8	—
	Mittel	**3,1**	**7,0**	**7,3**	—	**8,4**	**16,6**	**23,7**	—
B	1	3,5	6,2	8,9	—	17,9	24,4	43,6	—
	2	3,5	8,5	8,9	—	21,5	27,6	39,5	—
Westfalen	3	4,4	8,7	9,3	—	17,4	25,2	39,2	—
	4	3,8	7,1	8,5	—	18,6	27,8	25,1	—
(47,0 %)	5	3.7	8,3	9,4	—	21.4	27,8	37,2	—
	Mittel	**3,8**	**7,8**	**9,0**	—	**19,4**	**26,6**	**36,9**	—

Tabelle 9. (Fortsetzung.)

Herkunft des Kalkes (Wasserzusatz)	Versuch Nr.	Zugfestigkeit in kg/qcm nach				Druckfestigkeit in kg/qcm nach			
		28 Tagen	3 Monaten	6 Monaten	1 Jahr	28 Tagen	3 Monaten	6 Monaten	1 Jahr
C Westfalen (38,5 %)	1	3,7	5,8	4,5	—	12,6	11,4	22,8	—
	2	4,2	5,5	5,8	—	12,5	12,7	14,8	—
	3	4,2	6,3	4,7	—	12,8	13,1	17,0	—
	4	3,5	5,5	7,3	—	12,2	13,6	15,9	—
	5	3,3	5,2	7,0	—	8,2	22,5	15,6	—
	Mittel	**3,8**	**5,7**	**5,9**	—	**11,7**	**14,7**	**17,2**	—
D Westfalen (47,0 %)	1	—	—	—	—	11,2	14,6	32,0	31,0
	2	—	—	—	—	9,5	20,8	20,4	44,0
	3	—	—	—	—	11,5	17,0	24,0	35,0
	4	—	—	—	—	12,0	22,6	28,0	31,6
	5	—	—	—	—	11,8	21,4	26,0	30,8
	Mittel	—	—	—	—	**11,2**	**19,3**	**26,1**	**34,5**
E Westfalen (47,0 %)	1	2,5	3,8	10,2	11,0	7,7	11,4	27,0	35,4
	2	2,0	8,2	11,3	12,8	7,1	17,0	24,6	34,4
	3	2,3	5,8	10,4	10,5	7,1	13,4	28,0	34,2
	4	3,2	4,6	8,0	13,0	7,8	13,4	25,4	34,8
	5	2,5	7,1	9,8	12,3	5,4	11,6	27,0	34,4
	Mittel	**2,5**	**5,9**	**9,9**	**12,3**	**7,0**	**13,4**	**26,4**	**34,6**
F Westfalen (45,0 %)	1	2,5	5,6	5,0	5,8	11,6	12,4	27,7	29,4
	2	2,6	5,5	7,9	4,6	8,5	13,5	20,1	25,0
	3	3,6	3,7	4,8	5,4	8,6	13,5	15,8	25,0
	4	2,4	4,7	3,0	6,6	9,7	14,5	14,5	21,4
	5	3,6	4,5	5,0	5,5	10,5	10,9	21,1	33,3
	Mittel	**2,9**	**4,8**	**5,1**	**5,6**	**9,8**	**13,0**	**19,8**	**26,8**

Aus den gewonnenen Festigkeitszahlen geht hervor, daß die Eigenfestigkeit der verschiedenen Kalke recht verschieden ist.

So schwankt z. B. die Zugfestigkeit bei 6 Monaten Alter der geprüften Kalke zwischen 5,1 und 9,9 kg/qcm und die Druckfestigkeit zwischen 17,2 und 36,9 kg/qcm.

Die Zugfestigkeit hat im wesentlichen schon nach 3 Monaten ihr Ende erreicht; sie steigt nur bei zwei Kalken noch mit fortschreitendem Alter, jedoch in kaum nennenswertem Grade. Die Druckfestigkeit dagegen nimmt mit wachsendem Alter bis Jahresfrist stetig zu. Man kann diese Erscheinung mit der Annahme erklären, daß der Übergang des Kalkhydrats in kohlensauren Kalk in den kleinen Zugprobekörpern während der ersten 3 Monate sich soweit vollzogen hat, daß der größte bezw. gesamte Teil des Kalkhydrates in kohlensauren Kalk übergegangen ist und bei der weiteren Umwandlung des etwa noch vorhandenen geringen Teiles keine wesentliche Festigkeitssteigerung eintritt, während sich in der größeren Masse des Druckprobekörpers diese Umwandlung langsamer vollzieht. Diese Annahme wird durch die Gewichtsverhältnisse der Festigkeitskörper bei zunehmendem Alter bestätigt. Die Zugprobekörper nehmen von 3 Monaten Alter an nur noch in einem Falle an Gewicht zu; von diesem Zeitpunkte ab findet also Aufnahme von Kohlensäure kaum noch statt. Andererseits kann man auch annehmen, daß sich im Laufe der drei Monate eine solch dichte Schicht kohlensauren Kalkes gebildet hat,

daß die Kohlensäure der Luft nicht mehr tiefer oder nur noch äußerst langsam in den Körper einzudringen vermag. Das Gewicht der Druckprobekörper, das anfangs infolge Wasserverlust abnimmt, wächst nachher stetig bis zu der letzten zur Prüfung gelangten Altersstufe (1 Jahr). Aus dem Verlauf der Schaulinien (Fig. 2) darf geschlossen werden, daß die Druckfestigkeit des Kalkhydrats aller Kalke auch noch über ein Jahr hinaus eine lebhafte Steigerung erfahren wird.

Die Eigenfestigkeit der Luftkalke ist natürlich weit geringer als diejenige von Portland-Zement. Zum zahlenmäßigen Belege hierfür seien in Tab. 10 Zug- und Druckfestigkeit von drei Zementen für den reinen Zustand nach 7 und 28 Tagen Alter angegeben.

Tab. 10. **Festigkeit von Portland-Zement in reinem Zustande.**
Mittelwerte aus je 10 Einzelversuchen.

Bezeichnung des Zementes	Zustand beim Anmachen	Zugfestigkeit in kg/qcm nach		Druckfestigkeit in kg/qcm nach	
		7 Tagen	28 Tagen	7 Tagen	28 Tagen
Portland-Zement A	erdfeucht	63,6	63,2	515	696
	mörtelgerecht	39,2	54,0	342	554
Portland-Zement B	erdfeucht	51,9	65,7	354	490
	mörtelgerecht	27,5	35,4	244	350
Eisen-Portland-Zement C	erdfeucht	51,2	65,0	366	549
	mörtelgerecht	18,0	32,4	143	289

c) Einfluß der Art (Eigenschaften) der Zuschlagstoffe (Sand) auf die Erhärtung (Festigkeit) der Luftkalkmörtel.

Weitere Umstände, die für die Festigkeit der Kalkmörtel ausschlaggebend sind, sind die Eigenschaften des verwendeten Zuschlagstoffes (Sand), und zwar sowohl die physikalischen wie die chemischen.

Zu den ersteren sind zu rechnen die Korngröße und die durch diese bedingte Kornzusammensetzung, die Gestalt des Kornes und die Beschaffenheit der Kornoberfläche, sowie die Reinheit des Sandes (Gehalt an abschlämmbaren, d. h. erdigen, tonhaltigen oder lehmigen Bestandteilen), zu den letzteren die petrographische bezw. chemische Beschaffenheit.

Korngröße und Kornzusammensetzung des Sandes. Von der Korngröße und der Art der Kornzusammensetzung hängt der Gehalt an Hohlräumen im Sande und die Größe dieser Zwischenräume selbst ab[1]).

Gemischtkörniger Sand, d. h. solcher, in dem alle möglichen Korngrößen vertreten sind, besitzt geringeren Undichtigkeitsgrad, d. h. weniger Hohlräume, als Sand von gleichmäßigem Korn, sei es nun fein, mittelkörnig oder grob. Verwendet man bei der Mörtelbereitung aus Kalk Sand von gleichmäßigem Korn, so wird der Kalkteig im Mörtel nach dem Vermauern zu stark schwinden und infolgedessen der Zusammenhang des Mörtels gelockert.

[1]) Martens, Betrachtungen über Zementmörtel und Beton. Mitt. Materialpr.-Amt 1897. S. 89 ff.



Im allgemeinen hält man für Mauerzwecke den gemischtkörnigen Sand für den geeigneteren, namentlich für Arbeiten aus Zementmörtel oder -beton[1]). Diese, durch die Erfahrung, und soweit Zementmörtel in Betracht kommt, durch viele und ausgedehnte Versuche[2]) begründete Anschauung ist auch in diesem Falle zutreffend. Der Bindemittelverbrauch zur Erzielung gleich dichter Mörtel ist bei Verwendung gemischtkörnigen Sandes kleiner. Der feinkörnigere Sand bietet mehr Kornoberfläche für die Entwickelung der Verkittung mit dem Bindemittel.

Für Kalkmörtel ist im allgemeinen der mittelfeine oder sogar feine Sand der zweckmäßigste. Denn selbst wenn er auch verhältnismäßig mehr Hohlräume enthält als gemischtkörniger und grober Sand, so kann er doch nur kleine, d. h. enge Zwischenräume haben, wodurch das Schwinden des zwischen den Sandkörnern liegenden Kalkteiges, wenn auch nicht vermieden, so doch wesentlich verringert wird.

Bereits Hauenschild[3]) spricht für die Verwendung feinen Sandes bei Bindemitteln, die unselbständig erhärten (also Luftkalke).

Feichtinger verwirft ebenfalls den groben Sand, zieht aber das Gemisch aus feinem und grobem Sand vor. Er sagt[4]):

„Von Wichtigkeit ist dagegen die Größe der Sandkörner. Man unterscheidet hinsichtlich der Korngröße feinen, mittelgroben (Kiessand) und ganz groben Sand (Kies, Grand, Schotter, Grus). Ganz grober Sand, wie er zu Bruch- und Feldstein-Mauerwerk angewendet wird, bildet zu große Zwischenräume, in welchen der Kalk zu viel Masse hat und mürbe bleibt; um dies zu verhüten, sollte man dem groben Sande immer auch etwas feinen Sand zusetzen. Der alleinige Zusatz von feinem Sande ist wohl gut bei Mörtel für Mosaikfußböden, wo es sich um enge und gut passende Fugen handelt, derselbe ist aber nicht anwendbar für Mörtel bei gewöhnlichen Bauten, wo er stärkere Lagen und mehr massige Ausfüllungen bildet; für letztere sollte man grobkörnigen und feinkörnigen Sand zugleich verwenden."

Auch Professor Nußbaum[5]) empfiehlt den Zusatz feinen Sandes. Er spricht sich über den Einfluß des Sandes wie folgt aus:

„Der Kalkbrei schrumpft trocknend sehr stark, weil er beim Löschen mehr als sein gleiches Ausmaß an Wasser aufgenommen hat; wird er daher nicht im Mörtelgemenge gleichmäßig und fein verteilt, was nur unter Zusatz feinen Sandes gelingt, dann entstehen im Kalk beim Austrocknen zahlreiche Risse und Klüfte, die das Binden verhindern und daher selbst dann die Erhärtung vereiteln, wenn ein rasches Überführen des Ätzkalkes in kohlensauren Kalk stattfindet. Der Verfasser hat auch nach dieser Richtung eingehende Versuche angestellt und gefunden, daß stets eine Zerklüftung des Kalkes im Mörtelgemenge stattfand, sobald durch Absieben die feinsten Sandteilchen entfernt und nur die gröberen, scharfen Sandkörner im Mörtel belassen wurden."

Bei der Untersuchung von Festigkeitskörpern aus Kalkmörtel auf Gefügebeschaffenheit habe ich die gleichen Erscheinungen wiederholt beobachtet. Während nämlich Proben aus Mörtel mit Normalsand, der bekanntlich gleichmäßige mittlere Körnung besitzt, vielfach im Innern rissig und mürbe waren, zeigten solche aus gleichmäßigem feinkörnigem Mauersand wesentlich dichteres Gefüge.

---

[1]) Der Portland-Zement und seine Anwendungen im Bauwesen. 1905. S. 80 ff. und 115 ff. Kommissionsverlag der „Deutschen Bauzeitung" G. m. b. H., Berlin. R. Dyckerhoff, Dinglers polytechn. Journ. **226**, 645. Dr. Heintzel, Notizblatt d. deutschen Vereins f. Fabrikation von Ziegeln usw. 1876. S. 206. W. Michaelis, Dinglers polytechn. Journ. **230**, 74.

[2]) Böhme, Der Einfluß verschiedener Korngröße eines zu Zement-Normenproben benutzten Sandes auf die Bindefähigkeit. Mitt. Materialpr.-Amt 1883. S. 45.

[3]) Hauenschild, Katechismus der Baumaterialien. II. T. Mörtelsubstanzen. 1879. S. 230. Verlag Lehmann & Wentzel, Wien.

[4]) Feichtinger, Die chemische Technologie der Mörtelmaterialien. 1885. S. 68.

[5]) Die Erhärtung des Kalkmörtel. Beilage zu Nr. 33 der Zeitschr. f. Architektur- u. Ingenieurwesen 1897. S. 406.

Um auf dem Versuchswege den Einfluß der Korngröße des Sandes auf die Mörtelfestigkeit von Luftkalk — für Mörtel aus anderen Bindemitteln, namentlich Portland-Zement, ist dieser Einfluß durch zahlreiche Versuche[1]) bereits nachgewiesen — planmäßig festzustellen, wurden Versuche mit drei in der Korngröße verschiedenen Sanden angestellt. Die Versuchssande waren der bekannte Normalsand, mittelkörniger Mauersand aus einer Sandgrube und feinkörniger Sand aus einer Baugrube[2]).

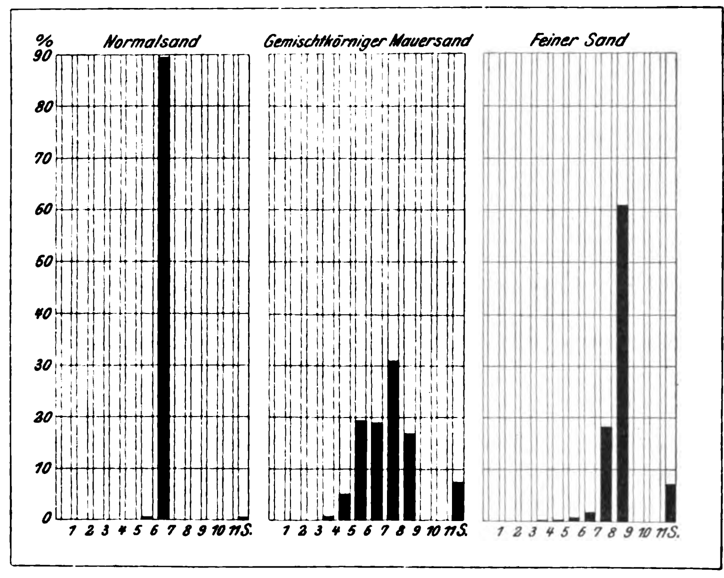


Fig. 3[3]).
Darstellung der Siebrückstände (Rückstände zwischen je zwei Sieben).
(Nach Tab. 11.)

Die beiden Mauersande waren ebenso wie der Normalsand reine Quarzsande; der mittelkörnige enthielt nur 0,08 %, der feinere nur 0,03 % in Salzsäure lösliche Bestandteile.

Die physikalischen Eigenschaften der Sande (die Mauersande wurden vor ihrer Prüfung und Verwendung getrocknet und auf dem Siebe mit vier Maschen für den qcm abgesiebt) sind aus Tab. 11 ersichtlich. Die Kornzusammensetzung ist außerdem durch Fig. 3 verdeutlicht.

---

[1]) R. Dyckerhoff, Dinglers polytechn. Journ. 226, 645. Dr. Heintzel, Notizblatt d. deutschen Vereins f. Fabrikation von Ziegeln usw. 1876. S. 206. W. Michaelis, Dinglers polytechn. Journ. 230. 74. L. Erdmenger, Tonindustrie-Zeitung. 1878. S. 140, 141 u. 250. Domcke, Notizblatt d. deutschen Vereins f. Fabrikation von Ziegeln usw. 1878. S. 145. Tomei, Tonindustrie-Zeitung 1878. S. 234. R. Dyckerhoff, Notizblatt d. deutschen Vereins f. Fabrikation von Ziegeln usw. 1880. S. 96. Delbrück, Ebenda 1880. S. 116. Arnold, Zeitschr. d. Hannov. Archit. u. Ingenieurw. 1883. S. 495. Dr. Böhme, Mitt. Materialpr.-Amt 1883. S. 45 und Tonindustrie-Zeitung 1883. S. 176. Feichtinger, 1885. S. 256 – 260. Der Portland-Zement und seine Anwendungen im Bauwesen. Berlin 1905. S. 80 u. 115. Kommissionsverlag der „Deutschen Bauzeitung". Gary, Mitt. Materialpr.-Amt 1898. Heft 3.

[2]) Um Klarheit über das Wesen der Rißbildung zu schaffen, werden Versuche mit gleichkörnigen Stücken verschiedener Korngröße anzustellen sein. Fig. 3 zeigt, welche großen Unterschiede in den Korngrößen-Verhältnissen bestehen.

[3]) Zeichendeutung siehe Fußbemerkung zu Fig. 1 S. 18.

Tab. 11. **Physikalische Eigenschaften der Sande** (im trockenen Zustande).
(Auf dem 4 Maschen-Siebe abgesiebt)

Sandart	Gewicht für 1 l Sand in kg			Spez. Gewicht	Dichtigkeitsgrad	Undichtigkeitsgrad	Korngröße											Gehalt an abschlämmbaren Bestandteilen
	eingelaufen	eingerüttelt	eingefüllt (im 10 l-Gefäß)					Rückstand	auf den Sieben mit der übergeschriebenen Anzahl Maschen für 1 qcm									
	R_f	R_r		s	$d = \frac{R_r}{s}$	$u = 1 - d$		%	1	4	9	20	60	120	324	900	S	%
Normalsand	1,404	1,684	1,468	2,661	0,633	0,367	Gesamt		—	—	—	0,0	0,5	89,9	0,6	—	—	Spuren
							Zwischen je 2 Sieben			—	—	0,0	0,5	89,4	0,6	—	—	
Mittelkörniger Mauersand aus einer Sandgrube[1]	1,641	1,910	1,675[3]	2,655	0,719	0,281	Gesamt			0,0	0,8	6,0	25,5	44,5	75,5	92,5	—	0,50
							Zwischen je 2 Sieben			0,0	0,8	5,2	19,5	19,0	31,0	17,0	7,5	
Feinkörniger Sand aus einer Baugrube[2]	1,492	1,795	1,508[4]	2,439	0,736	0,264	Gesamt			0,0	0,1	0,2	1,1	3,0	31,5	92,5	—	0,30
							Zwischen je 2 Sieben			0,0	0,1	0,1	0,9	1,9	28,5	61,0	7,5	

1) Gehalt an in Salzsäure löslichen Bestandteilen: 0,08 %.
2) „ „ „ „ „ „ „ : 0,03 %.
3) Litergewicht des grubenfeuchten Sandes: 1,362 kg; nach dem Trocknen: 1,341 kg.
4) „ „ „ „ : 1,249 kg; „ „ „ : 1,170 „

Der verwendete Kalk war ziemlich reiner Fettkalk aus Westfalen. Chemische Zusammensetzung und sonstige Eigenschaften dieses Kalkes siehe Tab. 12; vergl. auch Tab. 5, 6 und 7 (Kalk D).

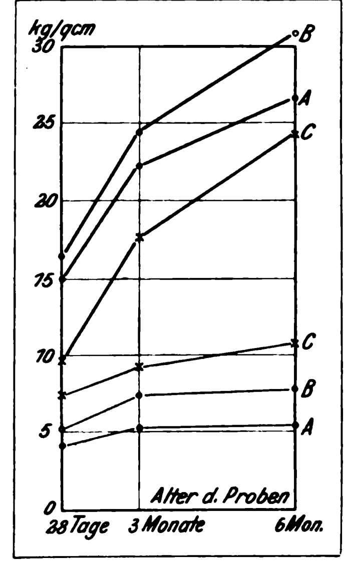
Aus dem zu Kalkteig abgelöschten Kalk und den Sanden wurden im Mischungsverhältnis 1 : 3 (nach Raumteilen) Mörtel und aus diesen Zug- und Druckproben in Normalformat wie üblich hergestellt.

Tab. 12. **Chemische und physikalische Eigenschaften des Kalkes.**

Glühverlust	Kohlensäure	Eisenoxyd u. Tonerde	Kalk	Schwefelsäure	Magnesia	Rest (Alkalien)	Ablöschung zu Kalkteig			5 kg Stückkalk ergaben an Kalkteig		Gehalt an steinigen Rückständen	Gewicht für 1 l Kalkteig eingefüllt	Gehalt an hygroskopischem Wasser
							Beginn des Ablöschens	Dauer des Ablöschens	Wasser-Anspruch					
%	%	%	%	%	%	%	Min.	Min.	%	kg	l	%	%	%
1,24	2,22	1,48	93,43	0,03	0,81	0,79	4	9	230[1]	15,1	11,4	0,6[1]	1,382	57,5

1) Bezogen auf das Gewicht des ungelöschten Kalkes.

Die Ergebnisse der Raumgewichtsbestimmung und der Prüfung der Körper auf Festigkeit sind in den Tabellen 13 und 14 enthalten, die letzteren außerdem in Fig. 4 zeichnerisch dargestellt. In Tab. 14a ist die Porenraumausfüllung der Mörtel berechnet und in Fig. 4a nebst den Raumgewichten (für 28 Tage) und den Festigkeitswerten (für 28 Tage und 6 Monate Alter) versinnlicht.



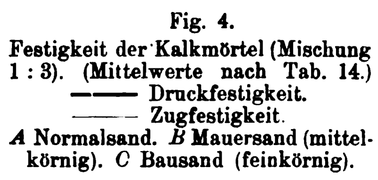


Fig. 4.
Festigkeit der Kalkmörtel (Mischung 1 : 3). (Mittelwerte nach Tab. 14.)
——— Druckfestigkeit.
——— Zugfestigkeit.
A Normalsand. *B* Mauersand (mittelkörnig). *C* Bausand (feinkörnig).

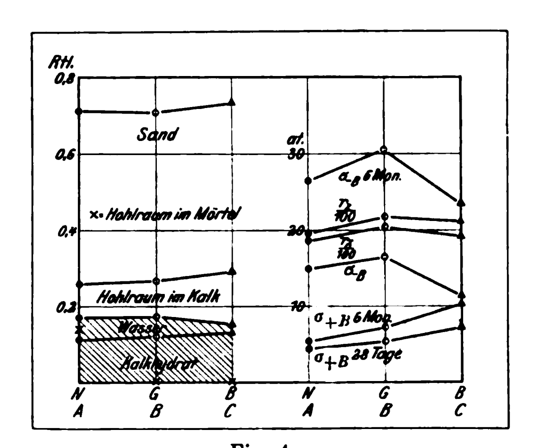


Fig. 4a.
Darstellung der Porenraumausfüllung im Mörtel (nach Tab. 14a), der Raumgewichte (nach Tab. 13) und der Festigkeiten (nach Tab. 14).
N(*A*) Normalsand. *G*(*B*) Grubensand. *B*(*C*) Bausand.

Tab. 13. **Raumgewicht der Zug- und Druckprobekörper zu Tab. 14.**

Mittelwerte aus je fünf Einzelversuchen.

Mörtelmischung (Raumteile)	1 Kalkteig + 3 Normalsand			1 Kalkteig + 3 Mauersand			1 Kalkteig + 3 feiner Sand		
Alter der Proben	28 Tage	3 Monate	6 Monate	28 Tage	3 Monate	6 Monate	28 Tage	3 Monate	6 Monate
	Raumgewicht g/ccm								
Zugproben	1,983	1,994	1,994	2,172	2,231	2,231	2,114	2,132	2,143
Druckproben	1,870	1,894	1,907	2,054	2,070	2,087	1,943	1,947	1,969

Tab. 14. Festigkeit einer Kalkmörtelmischung mit verschiedenen Sanden.

Die Probekörper erhärteten an der Luft im Zimmer.
Die in der Tabelle angegebenen Zahlen bedeuten kg/qcm.

Mörtelmischung (Raumteile)	1 Kalkteig + 3 Normalsand			1 Kalkteig + 3 Mauersand			1 Kalkteig + 3 feiner Sand		
Alter der Proben	28 Tage	3 Monate	6 Monate	28 Tage	3 Monate	6 Monate	28 Tage	3 Monate	6 Monate
Versuch Nr.	Zugfestigkeit								
1	3,7	4,8	5,3	5,2	7,2	8,2	7,5	9,1	**9,5**
2	4,4	5,3	5,0	4,6	7,6	8,6	7,0	9,0	**9,3**
3	4,4	5,3	5,5	4,7	7,4	7,7	6,0	10,0	**13,6**
4	4,1	5,2	5,6	5,4	7,0	7,8	7,6	9,4	**10,2**
5	4,0	5,6	5,0	5,6	7,5	6,6	7,8	8,5	**11,1**
Mittel	**4,1**	**5,2**	**5,8**	**5,1**	**7,3**	**7,8**	**7,2**	**9,2**	**10,7**
Versuch Nr.	Druckfestigkeit								
1	15,3	24,0	26,0	14,9	23,1	30,8	10,0	19,3	**23,2**
2	14,5	22,0	25,0	16,9	22,5	32,6	14,5	13,6	**24,9**
3	16,1	21,2	25,8	17,3	25,8	28,6	10,5	13,6	**24,7**
4	13,7	21,6	27,8	16,0	26,8	30,2	12,5	24,0	**24,2**
5	15,1	22,0	28,6	16,9	24,0	30,7	9,6	17,2	**24,2**
Mittel	**14,9**	**22,2**	**26,6**	**16,4**	**24,4**	**30,6**	**11,4**	**17,5**	**24,2**
Verhältnis Zug / Druck	$\frac{1}{3,6}$	$\frac{1}{4,3}$	$\frac{1}{5,0}$	$\frac{1}{3,2}$	$\frac{1}{3,3}$	$\frac{1}{3,9}$	$\frac{1}{1,6}$	$\frac{1}{1,9}$	$\frac{1}{2,3}$

Tab. 14a. Berechnung der Porenraumausfüllung der Mörtel mit verschiedenen Sanden.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Sandart	Mischung Kalkhydrat (0,587 kg)[1]) auf		In Raumteilen		Mörtelrückstand im Probekörper												
					Im Mörtelkörper ist vorhanden						In der Raumeinheit ist vorhanden					Vom Wasser dient zur	
			Sand		an dichter Masse				an Hohlraum		an dichter Masse			an Hohlraum			
	n kg Sand	mit 10 % Wasser auf 1 + n kg Masse	$\frac{1}{Rp} \times n$	Hohlraum Sp. 4 × $\mathfrak{u}_r$	Sand Sp. 4 × $\mathfrak{d}_r$	Kalkhydrat	Wasser	Summa	im Kalkhydrat	im Mörtel Sp. 4-9	Sand	Kalkhydrat	Wasser	im Mörtel	im Kalkhydrat	Füllung des Kalkhohlraumes	Benetzung des Sandes
	kg	%	l	l	l	l [2])	l	l	l	l	Rtl.	Rtl.	Rtl.	Rtl.	Rtl.	Rtl.	Rtl.
Normalsand	4,212	7,8	2,501	0,918	1,583	0,256	0,374	2,213	0,572	0,288	6,715	0,116	0,169	0,130	0,258	0,169	—
Mittelkörniger Grubensand	4,023	8,0	2,106	0,592	1,514	0,256	0,370	2,140	0,572	—	0,707	0,120	0,173	—	0,267	0,173	—
Feinkörniger Bausand	3,510	8,0	1,950	0,515	1,435	0,256	0,281	1,972	0,572	—	0,727	0,131	0,142	—	0,290	0,142	—

[1]) 1 l Kalkteig mit 57,2 % Wasser = 0,587 kg Kalkhydratpulver.

[2]) Das Gewicht für 1 l Kalkhydratpulver zu 0,700 kg und das spez. Gewicht des Kalkhydrats zu 2,2 angenommen; $\mathfrak{d}_r = 0,318$ und $\mathfrak{u}_r = 0,682$; 1 kg Kalkhydrat = 1,429 l mit 0,454 l dichter Masse und 0,975 l Hohlraum.

Aus den Raumgewichtswerten geht hervor, daß der gemischtkörnige Sand, wie zu erwarten war, die dichtesten Körper ergeben hat, die nächst dichteren, dem Raumgewicht der Sande selbst entsprechend, der feine Sand und die am wenigsten dichten der Normalsand. Die Druckversuche lieferten für den mittelkörnigen Mauersand die höchsten Werte, die zunächst niedrigeren der Normalsand und die niedrigsten der feine Sand. Bei den Zugversuchen ergab der feine Sand die höchsten Werte, die nächst niedrigeren der Mauersand und die ungünstigsten der Normalsand.

Dies Ergebnis entspricht dem Verhältnis der Porenraumausfüllung (Tab. 14a) der Mörtel. Diese Versuche über den Einfluß der Korngröße sollen in erweitertem Maße fortgesetzt werden.

Kornbeschaffenheit und Kornform des Sandes. Außer der vorgenannten Eigenschaft ist auch die Art des Korns, d. h. die Kornbeschaffenheit des Sandes von Einfluß auf die Festigkeit des Mörtels. Körner mit rauhen Flächen haben in der Regel größeres Haftvermögen, als solche mit glatten Flächen; runde Körner wirken anders als eckige. Allgemein zieht man für Mörtelzwecke scharfkantige und eckige Sande den rundkörnigen vor.

Gottgetreu sagt[1]):

„Der beste Sand ist in seiner äußeren Beschaffenheit mittelgroß, mit rauhen Begrenzungsflächen, scharfen Kanten und Ecken versehen und ist dem feinkörnigen, abgerundeten und abgeschliffenen Sande vorzuziehen."

Dieses Vorurteil gegen den runden Sand scheint unbegründet. Es beruht vielleicht auf der Annahme, daß rundes Korn gleichbedeutend ist mit glattem Korn Dies ist indes nicht für alle Fälle zutreffend.

Wenn man Gelegenheit nimmt, die Oberflächenbeschaffenheit der Körner eines anscheinend rundkörnigen Sandes genau zu untersuchen, wird man häufig finden, daß die Oberfläche der Körner von feinen Furchen und Riefeln durchzogen ist.

In ähnlichem Sinne äußert sich schon Feichtinger[2]):

„Dem runden Sande zieht man oft den eckigen und kantigen Sand vor, wohl ohne Grund. Daß der Kalkbrei an Sandkörnern mit rauhen Flächen besser adhäriert, als an solchen mit glatten, ist begreiflich; daß aber die runden Kanten und Ecken die Adhäsion zu vermehren imstande sein sollen, ist nicht wahrscheinlich"

Nach Versuchen von Gary[3]), die dieser mit Normalsand aus verschiedenen Ländern ausgeführt hat, haben die aus Quarzitgesteinen gebrochenen, sehr scharfkantigen Sande, wenn auch verhältnismäßig hohe Zugfestigkeiten, so doch geringere Druckfestigkeiten ergeben, als die übrigen Sande, die aus Natursand (Gruben- oder Seesand) von mehr oder weniger rundlichem Korn gewonnen waren.

Zu ähnlichen Ergebnissen gelangte auch Feret[4]) bei vergleichenden Versuchen mit verschiedenen als Sand benutzten Zuschlagstoffen zur Ermittelung des Einflusses der Beschaffenheit des Zuschlagmaterials auf die Festigkeit des Mörtels. Auch er fand die höheren Werte bei dem Material mit rundlichem Korn.

Reinheit. (Gehalt an abschlämmbaren — tonigen oder lehmigen — Bestandteilen.) Eine mehr oder minder wichtige Rolle spielt

---

1) Gottgetreu, Physische und chemische Beschaffenheit der Baumaterialien. 1881. Bd. 2. S. 264. Verlag Julius Springer, Berlin, und Arnold, Zeitschr. d. Hannov. Archit. u. Ingenieurw. 1883. S. 495. Wagners Institut d. chem. Techn. 1883. S. 635.

2) Feichtinger, Die chemische Technologie der Mörtelmaterialien. 1885. S. 68.

3) Gary, Normalsande. Mitt. Materialpr.-Amt 1898. Heft 3. S. 121 ff. Vergl. auch die zahlreichen Photographien von Normalsanden.

4) Feret, Einfluß der Natur des Sandes auf die Eigenschaften der Mörtel. Baumaterialienkunde 1900. Jahrg. 5. Heft 2 und Tonindustrie-Zeitung 1900. Nr. 36 u. 39.



ferner bei der Erhärtung des Mörtels die Reinheit des Sandes. Tonige oder lehmige Bestandteile, die fest an der Oberfläche der Körner haften, wirken schädigend auf den Zusammenhang zwischen Bindemittel und Zuschlagstoff, weil sie die innige Verkittung zwischen beiden verhindern und damit ungünstig auf die Erhärtung des Mörtels wirken[1]). Als lose Beimischungen sind Lehm und Ton nicht besonders nachteilig, vorausgesetzt, daß deren Gehalt nicht zu hoch ist. Diese Tatsache ist durch umfangreiche, von amerikanischen Forschern[2]) ausgeführte Versuchsreihen, wenn auch nur für Zementmörtel und -beton, bestätigt worden.

Sande mit organischen, namentlich humus- oder torfartigen Stoffen sind ebenfalls für die Mörtelbereitung nicht geeignet. Solche oder lehmige Sande müssen nötigenfalls vor der Verwendung gewaschen werden.

Natur (Petrographische Beschaffenheit des Sandes). Den bei weitem größten Einfluß von allen Eigenschaften des Zuschlagstoffes auf die Erhärtung von Kalkmörtel, wie von Mörteln überhaupt, übt die Natur, d. h. die chemische und petrographische Beschaffenheit des Sandes aus.

Die Erfahrung hat gelehrt und viele Versuche haben diese Erfahrungen bestätigt, daß Mauersand nicht, wie häufig vorgeschrieben wird, aus reinem Quarzsand zu bestehen braucht, um verwendbar zu sein; vielmehr sind auch aus verschiedenartigen Gesteinstrümmern, und zwar aus anderen Materialien als aus Quarz, zusammengesetzte Sande als Bausande sehr wohl verwertbar.

Gottgetreu[3]) äußert sich in dieser Beziehung wie folgt:

„Quarzsand ist dem Kalk- und Dolomitsand vorzuziehen, grobkörniger, scharfkantiger Quarzsand mit 5—10% granitischen oder feldspatartigen Geschieberesten ist der beste Bausand. Wo diese Geschiebereste im Sande ganz fehlen, oder wo man nur Kalk- oder Dolomitsand zur Verfügung hat, wird man mit Vorteil dem Mörtel derartige Geschiebereste zusetzen und wäre die zu wählende Form die des grobkörnigen Sandes; vorherrschende Feldspatgesteine würden hier den Vorzug verdienen. Fehlen diese, so würden Glimmer, Granit, Syenit oder andere Hornblendgesteine immer mit Rücksicht auf ihren Gehalt an Alkali-Silikaten zu verwenden sein."

Im teilweisen Gegensatze hierzu sagt Feichtinger[4]):

„Es ist nicht richtig, daß Quarzsand einen besseren Mörtel gibt als Kalksand, wie oft angenommen wird; denn die Erfahrung lehrt, daß auch Kalk- und Dolomitsand einen Mörtel von außergewöhnlicher Härte gibt."

Besonders geeignet zur Herstellung von Mauermörtel sind solche Sande, die lösliche Kieselsäure in irgend einer Form, z. B. leicht aufschließbare Silikate (Zeolithe), enthalten. Sie finden sich nach den Arbeiten von G. Lunge und C. Millberg (Tonindustrie-Zeitung, 1897, S. 800) als eigentlich wirksame, d. h. mit dem Kalkhydrat sich zu Kalksilikat verbindende Bestandteile in Puzzolanen und Trassen vor. Diese Tatsache hat Donath durch seine nach dieser Richtung hin ausgedehnten Untersuchungen[5]) bestätigt gefunden; er erkennt gerade in dem Gehalt der Sande an leicht zersetzbaren, d. h. verbindungsfähige Kieselsäure enthaltenden Stoffen ein Mittel zur Bewertung des Mörtelsandes. Seine Anschau-

[1]) Schott, Notizblatt d. deutschen Vereins f. Fabrikation von Ziegeln usw. 1879 und 178.

[2]) Sherman, Der Einfluß des Vorhandenseins von Lehm oder Ton im Sande auf die Festigkeit des Mörtels oder Betons. Engineering News 1903. Nr. 21. S. 443 und Baumaterialienkunde 1903. Heft 24. Plake, Engineering News 1904. Nr. 17. S. 413 und Baugewerkszeitung 1904. Nr. 55. S. 720 ff.

[3]) Gottgetreu, Physische und chemische Beschaffenheit der Baumaterialien. 1881. Bd. 2. S. 264.

[4]) Feichtinger, Die chemische Technologie der Mörtelmaterialien. 1885. S. 68.

[5]) Tonindustrie-Zeitung 1900. Nr. 3. S. 21 u. Nr. 6. S. 56.

ung findet Unterstützung durch die Ergebnisse der Versuche, die Böhme[1]) mit dem in der Eifel vorkommenden vulkanischen Sande behufs Feststellung der Verwendbarkeit desselben zur Mörtelbereitung ausgeführt hat.

Tab. 15. Einfluß der chemischen Beschaffenheit des Sandes auf die Festigkeit von Kalkmörtel.

Festigkeit von Kalkmörtel aus Rüdersdorfer Kalk und Normalsand bezw. Vulkansand.

Mittelwerte aus je 10 Einzelversuchen.

Mörtelmischung in Gewichtsteilen	Art der Erhärtung	Zugfestigkeit in kg/qcm nach			Druckfestigkeit in kg/qcm nach		
		28 Tagen	90 Tagen	1 Jahr	28 Tagen	90 Tagen	1 Jahr
1 Rüdersdorfer Kalk + 4 Normalsand	An der Luft	1,78	2,62	3,47	7,2	14,6	18,6
	Unter Wasser	3,85	4,52	5,16	11,4	27,1	35,4
1 Rüdersdorfer Kalk + 4 feiner vulkan. Sand	An der Luft	8,20	18,50	25,60	51,7	89,2	135,7
	Unter Wasser	6,85	11,70	14,30	42,3	80,9	122,5
1 Rüdersdorfer Kalk + 4 grober vulkan. Sand	An der Luft	10,20	18,65	25,50	51,5	87,6	128,1
	Unter Wasser	6,25	11,35	11,75	49,3	80,9	118,1

Verhältniszahlen; Festigkeit des Normalsandmörtels = 100.

Mörtelmischung in Gewichtsteilen	Art der Erhärtung	Zug 28 Tagen	Zug 90 Tagen	Zug 1 Jahr	Druck 28 Tagen	Druck 90 Tagen	Druck 1 Jahr
1 Rüdersdorfer Kalk + 4 feiner vulkan. Sand	An der Luft	460	706	738	718	611	730
	Unter Wasser	178	259	277	371	299	346
1 Rüdersdorfer Kalk + 4 grober vulkan. Sand	An der Luft	573	712	735	715	600	689
	Unter Wasser	162	251	228	432	299	334

Diese Ergebnisse, die zum Teil in Tabelle 15 wiedergegeben sind, zeigen deutlich die Überlegenheit des infolge seiner chemischen Zusammensetzung stark hydraulisch wirkenden Vulkansandes vor dem Normalsande, einem aus reinem Quarz bestehenden Sande, und zwar sowohl bei Luft- als auch namentlich bei Wassererhärtung. Der Grad der durch den Vulkansand bewirkten Festigkeitsverbesserung ist aus den in genannter Tabelle verzeichneten Verhältniszahlen ersichtlich.

In welchem Grade solche im Zuschlagmaterial enthaltene verbindungsfähige oder richtiger aufgeschlossene Kieselsäure die Erhärtungsenergie der Kalkmörtel zu fördern vermag, zeigen auch noch andere in der Abteilung für Baumaterialprüfung ausgeführte vergleichende Versuche mit Kalkmörtel aus Mauersand einerseits und aus Basaltmehl andererseits, deren Ergebnisse hier wiedergegeben seien[2]).

[1]) Mitt. Materialpr.-Amt 1889. Ergänzungsheft 1.

[2]) Baumaterialienkunde 1902.

Zweck dieser Versuche war zunächst, die Eigenschaften des durch Zerkleinern von Basalt gewonnenen Basaltsandes und dessen Brauchbarkeit zur Mörtelbereitung festzustellen.

Das Probematerial bestand aus:

1. gebranntem Rüdersdorfer Stückkalk (Fettkalk), der zu Kalkteig abgelöscht wurde;
2. Berliner Mauersand, wie er von Berliner Mörtelwerken zur Mörtelbereitung verarbeitet wird;
3. Basaltmehl, das von dem Basaltwerk Roßberg zu Ober-Rammstadt eingereicht wurde.

Kalkteig und Mauersand bezw. Basaltmehl wurden im Verhältnis 1:3 nach Raumteilen gemischt und aus den daraus gewonnenen erdfeucht angemachten

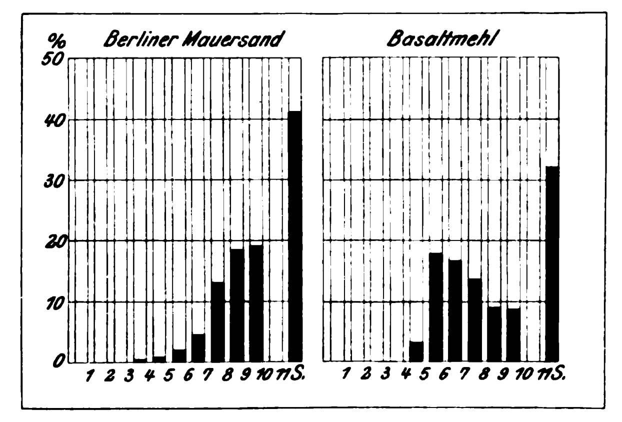


Fig. 5 [1]).
Darstellung der Siebrückstände der Sande (Rückstand zwischen je zwei Sieben). (Nach Tab. 17.)

Mörteln Zug- und Druckprobekörper normengemäß hergestellt. Die Körper lagerten im Zimmer an der Luft. Die Eigenschaften der Mörtelstoffe sind in Tab. 16 und 17, die Ergebnisse der mit den Mörteln angestellten Festigkeitsversuche in Tab. 18 verzeichnet. Darstellung der Siebrückstände der Sande siehe Fig. 5.

Tab. 16. Eigenschaften des Rüdersdorfer Stückkalkes.

Mittleres Gewicht für 1 l Stückkalk in Walnußgröße	Wasserzusatz beim Ablöschen zu Kalkteig	Löschbeginn nach	Dauer der Ablöschung	Ergiebigkeit von 5 kg Stückkalk nach 7 Tagen Lagerung		Gehalt an steinigen Rückständen	Mittleres Gewicht für 1 l Kalkteig	Gehalt an hygroskopischem Wasser
				Gewicht	Rauminhalt			
kg	%	Min.	Min.	kg	l	%	kg	%
0,885	220	30	43	15,5	12,2	1,1 [2])	1,304	54,6

[1]) Zeichendeutung siehe Fußbemerkung zu Fig. 1. S. 18.
[2]) Bezogen auf die Gewichtsmenge des ungelöschten Kalkes (5 kg).

Tab. 17. Eigenschaften der Zuschlagstoffe.

Zuschlag-material	Mittleres Litergewicht R_f eingelaufen kg	Mittleres Litergewicht R_r eingerüttelt kg	Spezifisches Gewicht s	Dichtigkeitsgrad $b = \frac{R_r}{s}$	Gehalt an Hohlräumen $u = 1-b$	Siebrückstände: Rückstand	°/o	Sieb mit der übergeschriebenen Anzahl Maschen für 1 qcm: 4	9	20	60	120	240	600	900	S
Berliner Mauersand	1,568	1,863	2,653	0,702	0,298	Gesamt auf den Sieben	—	0,0	0,4	1,0	3,0	7,5	21,5	40,0	59,0	
						Zwischen je 2 Sieben		0,0	0,4	0,6	2,0	4,5	14,0	18,5	19,0	41,0[1]
Basaltmehl	1,552	2,029	3,053	0,665	0,335	Gesamt auf den Sieben	—	—	0,0	3,0	20,5	37,0	50,5	59,5	68,0	
						Zwischen je 2 Sieben		—	0,0	3,0	17,5	16,5	13,5	9,0	8,5	32,0[2]

[1]) 41,0 °/o Sand gingen durch das feinste angewendete Sieb.
[2]) 32,0 °/o Basaltmehl gingen durch das feinste angewendete Sieb.

Tab. 18. Mörtelfestigkeit von Mischungen aus Luftkalk und Mauersand bezw. Basaltmehl.

Mittelwerte aus je 10 Einzelversuchen.

Mörtelmischung in Raumteilen	Mittleres Raumgewicht g/ccm 2 Tage nach dem Einschlagen: Zugproben	Druckproben	Zugfestigkeit in kg/qcm nach: 28 Tagen	90 Tagen	6 Monaten	1 Jahr	Druckfestigkeit in kg/qcm nach: 28 Tagen	90 Tagen	6 Monaten	1 Jahr	Bemerkungen
1 Kalkteig + 3 Mauersand (6,7 °/o) [1])	2,012	2,099	6,3	7,1	7,5	8,5	14,2	22,9	28,0	35,8	Die Proben erhärteten im Zimmer an der Luft.
1 Kalkteig + 3 Basaltmehl (0,5 °/o) [1])	2,303	2,380	7,7	7,7	10,0	11,1	44,9	51,0	65,8	67,8	
1 Kalkteig + 3 Mauersand + 1 Basaltmehl (7,3 °/o) [1])	2,187	2,220	5,8	6,4	6,7	6,9	22,2	28,6	32,1	39,1	

Verhältniszahlen; Festigkeit des Mauersandmörtels = 100.

Mörtelmischung	Zugproben	Druckproben	28 Tagen	90 Tagen	6 Monaten	1 Jahr	28 Tagen	90 Tagen	6 Monaten	1 Jahr
1 Kalkteig + 3 Basaltmehl	—	—	122	108	133	131	316	223	235	189
1 Kalkteig + 3 Mauersand + 1 Basaltmehl	—	—	88	90	89	81	142	125	115	109

[1]) Wasseranspruch, bezogen auf den getrockneten Mörtel.

Die Festigkeitszahlen, die der leichteren Übersicht wegen in Fig. 6 veranschaulicht sind, sprechen für sich selbst. Wie ersichtlich, wird das Erhärtungsvermögen des Kalkmörtels durch das Basaltmehl außerordentlich erhöht, und zwar beträgt die Festigkeitssteigerung gegenüber dem Mörtel aus Mauersand bei 1 Jahr Alter der Proben 31 % für Zug und 89 % für Druck. Sogar der mit 1 Tl. Basaltmehl gemischte Mauersandmörtel erreicht noch höhere Druckfestigkeit, als der reine Mauersandmörtel. (Siehe Verhältniszahlen.)

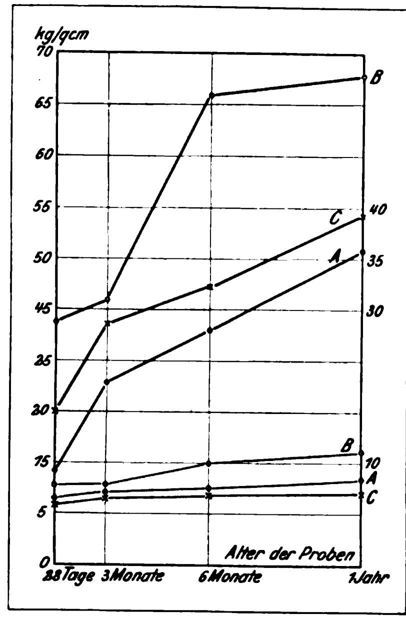


Fig. 6.
Festigkeit von Mörtel aus Luftkalk und Mauersand bezw. Basaltmehl. (Nach Tab. 18.)
——— Zugfestigkeit.
——— Druckfestigkeit.
A 1 Kalkteig + 3 Mauersand. *B* 1 Kalkteig + 3 Basaltmehl. *C* 1 Kalkteig + 3 Mauersand + 1 Basaltmehl.

Die ein Jahr alten Proben wurden außerdem auf Gehalt an löslicher Kieselsäure untersucht. Dieser ergab sich für den Mauersandmörtel auf 0,04 % und für den Basaltmörtel (nach dem Behandeln mit verdünnter Salzsäure) zu 14,0 %.

Die lösliche Kieselsäure im Mauersandmörtel, deren Menge an und für sich sehr gering ist, rührt vermutlich von dem Kalk bezw. dessen Tongehalt her. Bekanntlich enthalten auch die reinsten Kalke lösliche Kieselsäure, wenn auch nur in Spuren. Jedenfalls ist das Ergebnis dieser Prüfung ein Beweis dafür, daß chemische Einwirkung des Kalkes aus Quarzsand und etwaige Bildung von Kalksilikat unter normalen Umständen nicht stattfindet.

Das festgestellte überraschend günstige Erhärtungsvermögen des Basaltmörtels ist im vorliegenden Falle wohl nicht einzig und allein auf den Einfluß der löslichen Kieselsäure im Basaltmehl, sondern zum Teil wahrscheinlich auch auf dessen vorteilhafte Kornzusammensetzung und die dadurch bedingten günstigen Dichtigkeitsverhältnisse des Mörtels zurückzuführen.

Der aus den vorstehend mitgeteilten Mörtelfestigkeiten hervorgehende die Erhärtung von Kalkmörtel fördernde Einfluß der Stoffe mit aufgeschlossener Kieselsäure ist auch aus dem Befunde weiterer in der Abteilung für Baumaterialprüfung mit Mörteln aus Luftkalk und hydraulischen Kalken ausgeführter Versuche (s. Mitt. Materialpr.-Amt 1894 Heft 4, und 1902, Heft 6) ersichtlich.

Wirkungsfähigkeit der löslichen (verbindungsfähigen) Kieselsäure und der Stoffe mit solcher. Um die verbindungsfähige Kieselsäure, sei sie nun als reines Silikat (Zement, hydraulischer Kalk, Si-Stoff usw.) oder in Form sogenannter hydraulischer Zuschläge (Puzzolan, Traß, Santorinerde, Vulkansand, Bimssand, Schlackensand usw.) vorhanden, in den „lockeren" Mörteln zur vollen Wirksamkeit zu bringen, müssen besondere Bedingungen erfüllt werden, nämlich:

1. die Silikatzuschläge müssen eine gewisse Feinheit haben;
2. der aus ihnen in Verbindung mit Kalkhydrat hergestellte Mörtel muß gut verdichtet sein und

3. während des Erhärtens muß genügende Feuchtigkeitszufuhr stattfinden können.

Besonderes Interesse an diesem Gegenstande hat mich, angeregt durch die Arbeiten von Donath[1]) veranlaßt, die Frage der Wirkung leicht aufschließbarer Silikate im Kalkmörtel zu verfolgen und insbesondere durch planmäßige Versuche festzustellen, inwieweit die Festigkeit der Mörtel von den genannten drei Umständen abhängig ist.

Als besonders geeignet zu diesen Versuchen erschien der sogenannte Si-Stoff, ein Abfallstoff der Alaunfabrikation, der im wesentlichen aus löslicher d. h. verbindungsfähiger Kieselsäure besteht und aus diesem Grunde auch die Bezeichnung Si-Stoff erhalten hat[2]).

Einfluß von Si-Stoff auf dessen Erhärtung von Kalkmörtel

Zunächst wurde allgemein der Einfluß des Zusatzes von Si-Stoff auf die Festigkeit von Kalkmörtel durch drei Versuchsreihen festgestellt. Es wurden geprüft:

Versuchsreihe 1: Kalkmörtel aus 1 Gewichtsteil Kalkteig + 4 Gewichtsteile Normalsand im Vergleich mit 1 Gewichtsteil Kalkteig + 4 Gewichtsteile Normalsand + 0,5 Gewichtsteile Si-Stoff.

Versuchsreihe 2: Kalkmörtel aus einem Berliner Mörtelwerk, der schon längere Zeit im Freien gelagert hatte, im Vergleich mit 100 Gewichtsteilen Kalkmörtel + 5 Gewichtsteilen Si-Stoff.

Versuchsreihe 3: Kalkmörtel aus einem Berliner Mörtelwerke, der frisch angeliefert war, im Vergleich mit 100 Gewichtsteilen Kalkmörtel + 5 Gewichtsteilen Si-Stoff.

Aus den Mörteln wurden Druckprobekörper normengemäß hergestellt und nach verschiedenen Zeiträumen, während deren sie im Laboratorium an der Luft lagerten, der Druckprobe unterzogen.

Der verwendete Kalk war Fettkalk mit 96,16 % Ätzkalkgehalt; der benutzte Si-Stoff hatte folgende chemische Zusammensetzung:

In Salzsäure und verdünnter Alkalilauge unlösliche Bestandteile	Ton und Sand	21,60 %
	Kohlenstoff	9,56 „
Kieselsäure, lösliche		38,31 „
Eisenoxyd		0,28 „
Tonerde		4,69 „
Kalk		0,82 „
Magnesia		Spuren
Kali, Natron		0,62 „
Schwefelsäure		4,73 „
Wasser		20,00 „

Aus den gewonnenen Festigkeitswerten (Tab. 19) und dem Verlauf der sie darstellenden Schaulinien (Fig. 7) geht deutlich hervor,

daß die Festigkeit des Kalkmörtels, namentlich dessen Anfangserhärtung, durch den Zusatz von Si-Stoff außerordentlich begünstigt wird.

1) Tonindustrie-Zeitung 1900. Nr. 124. S. 1747 ff.

2) Mitt. Materialpr.-Amt 1900. Heft 3. S. 143 ff.

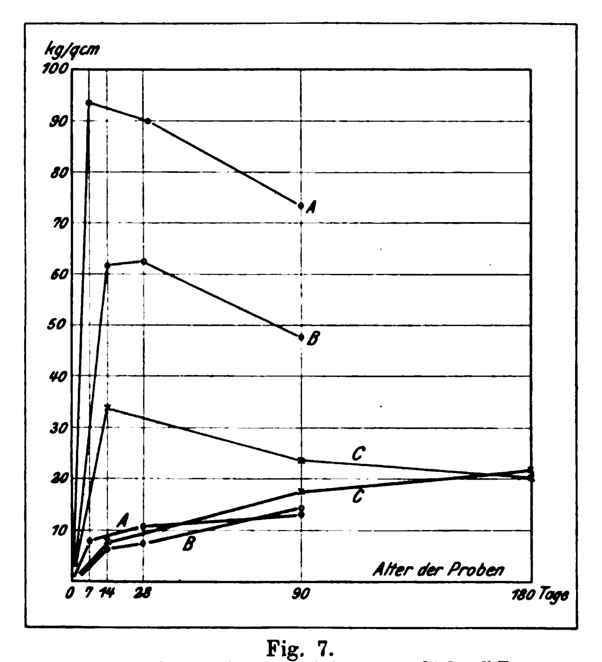


Fig. 7.
Festigkeit von reinem Kalkmörtel und solchen mit Si-Stoff-Zusatz nach Tab. 19.
——— Reiner Kalkmörtel. ——— Kalkmörtel mit Si-Stoff-Zusatz.
• Versuchsreihe 1 (*A*). o Versuchsreihe 2 (*B*). × Versuchsreihe 3 (*C*).

Tab. 19. Einfluß des Zusatzes von Si-Stoff auf die Erhärtung (Festigkeit) von Kalkmörtel.

Ergebnisse der Druckversuche mit Kalkmörtel ohne und mit Si-Stoff-Zusatz.

Mittelwerte aus je fünf Einzelversuchen.

Versuchsreihe	Mörtelmischung	Druckfestigkeit in kg/qcm nach					Verhältniszahlen: Festigkeit des reinen Kalkmörtels = 100				
		7 Tagen	14 Tagen	28 Tagen	90 Tagen	180 Tagen	7 Tage	14 Tage	28 Tage	90 Tage	180 Tage
1	1 Gewichtst. Kalkteig [1]) + 4 „ Normalsand	8,0	—	10,7	13,7	—	100	—	100	100	—
	1 Gewichtst. Kalkteig + 4 „ Normalsand + 0,5 „ Si-Stoff	93,3	—	90,0	73,2	—	1166	—	841	534	—
2	Kalkmörtel [2]) aus einem Berliner Mörtelwerk	—	6,4	7,3	14,0	—	—	100	100	100	—
	10 Gewichtst. Kalkmörtel + 5 „ Si-Stoff	—	61,6	62,4	47,6	—	—	963	855	340	—
3	Kalkmörtel [3]) aus einem Berliner Mörtelwerk	—	7,6	—	17,2	21,5	—	100	—	100	100
	100 Gewichtst. Kalkmörtel 5 „ Si-Stoff	—	33,8	—	23,3	20,5	—	445	—	135	95

[1]) Zusammensetzung des Kalkes (geglüht): Kieselsäure 2,60 %, Eisenoxyd und Tonerde 1,20 %, Kalk 96,16 %, Rest (Alkalien resp. Magnesia) 0,04 %.

[2]) Die Mörtel hatten längere Zeit im Freien gelagert. Das zu den Versuchen benutzte Material war aus dem Innern des Mörtelhaufens entnommen.

[3]) Der Mörtel war frisch angeliefert.

Der Grad dieses Einflusses ist aus den Verhältniszahlen (Tab. 19) ersichtlich. Hiernach wird z. B. die Festigkeit des Kalkmörtels der Reihe 1 für sieben Tage Alter durch den Si-Stoff-Zusatz (von 0,5 Gewichtsteilen) um mehr als 1000 % erhöht.

In ähnlicher Weise wird die Festigkeit der in fertigem Zustande bezogenen Kalkmörtel durch den Zuschlag von 5 Teilen Si-Stoff (Reihe 2 und 3) gesteigert.

Weiter geht jedoch schon aus den Ergebnissen der drei Versuchsreihen hervor, daß die Festigkeit der mit Si-Stoff versetzten an der Luft erhärteten Mörtel mit fortschreitendem Alter zunächst zunimmt, von einem gewissen Zeitpunkte aber abnimmt.

Die Festigkeitsabnahme ist bei Reihe 3 so groß, daß die Festigkeit des Si-Stoff-Mörtels bei 180 Tagen sogar etwas geringer ist, als die des gewöhnlichen Kalkmörtels. Die Festigkeitsunterschiede zwischen den ungemischten und gemischten Mörteln werden infolge dieses Rückganges mit zunehmendem Alter stetig geringer.

Auf diese Erscheinung und deren Ursachen soll weiter unten zurückgekommen werden.

Einfluß der Korngröße (Feinheit der Mahlung). Daß hydraulische Zuschläge, wenn sie einigermaßen wirksam sein sollen, einen gewissen Feinheitsgrad besitzen müssen, ist bekannt. Für Portland-Zement haben bereits Knapp, Schott, Michaelis, Feret, Buttler[1]) und andere Forscher nachgewiesen, daß nur die feinsten Teilchen an der Erhärtung teilnehmen und daß die gröberen Körner nur oberflächlich wirksam sind, innen dagegen inert und unzersetzt und daher an der Mörtelbildung unbeteiligt bleiben.

Die Wirkung des Feinmahlens auf die Erhärtungsfähigkeit von Puzzolanen haben G. Lunge und C. Millberg[2]), sowie Feret[3]) zum Gegenstande eingehender Studien gemacht. Auch diese Forscher stellten fest, daß die Puzzolane nur dann besonders wirksam sind, wenn sie genügend fein zerkleinert werden. Zerkleinerung bedeutet Vergrößerung der Angriffsfläche und diese bewirkt Zunahme der chemischen Wirkung.

Einfluß der Art des Mischens und der Höhe des Wasserzusatzes. Bei jeder Art Mörtel ist es auf die später zu erlangende Festigkeit von Einfluß[4]), in welchem Grade der Mörtel bei der Bereitung und Verarbeitung verdichtet wird. Im besonders hohen Maße ist dies bei Mörteln mit Silikatzuschlägen der Fall, d. h. bei solchen, in denen das Bindemittel erst durch die Mischung aus Kalkhydrat und dem hydraulischen Zusatz gebildet wird[5]). Da die Erhärtung der Mörtel aus Kalkhydrat und hydraulischen Zuschlägen auf der Wechselwirkung zwischen diesen beiden Stoffen beruht, ist es klar, daß die Erhärtungsenergie solcher Mörtel erst zur vollen Entfaltung kommen kann, wenn in erster Linie diese beiden Stoffe möglichst innig miteinander verkittet und in zweiter Linie die Mörtel selbst, d. h. die Masse aus dem Kalk-Silikatzuschlaggemisch und Sand genügend verdichtet sind. Auf die Bedeutung der innigen Lagerung und Verkittung der Bindemittelteilchen für die spätere Erhärtung hat bereits Knapp[6]) hingewiesen. Knapp sagt u. a.:

---

[1]) Tonindustrie-Zeitung 1898. Nr. 21. S. 63 ff.

[2]) Tonindustrie Zeitung 1897. S. 809.

[3]) Tonindustrie-Zeitung 1900. Nr. 124. S. 1747 ff.

[4]) Gary, Über die Ursachen der Abweichungen in den Festigkeitsergebnissen der Zementprüfungen an verschiedenen Orten. Mitt. Materialpr.-Amt 1898. Heft 1. S. 1 ff.

[5]) Burchartz, Traß und Traßmörtel. Mitt. Materialpr.-Amt 1900. S. 206.

[6]) Dinglers polytechn. Journ. 1871. S. 515.

„Nur wenn bei diesem chemischen Prozeß (Erhärtung) zugleich die mechanische Lagerung und Anordnung der Teilchen so ausfällt, daß sie mit hinreichender Kraft aneinander haften können, wird die Versteinung möglich sein.“

Ferner hat Martens[1]) sich eingehend über den Einfluß der Sandbeschaffenheit, Korngrößenverhältnisse, Oberflächengröße und des Dichtigkeitsgrades im Mörtel- und Betonskelett, sowie des Feinheitsgrades der Bindemittel auf die Entfaltung der Bindekraft ausgesprochen.

Der Grad dieser Verdichtung, dessen Einfluß für die Traßmörtel bekannt und auch durch viele Versuche nachgewiesen ist, (weshalb für die Herstellung von Traßmörtel besonders richtiger Wasserzusatz und ausreichendes Mischen und Verarbeiten vorgeschrieben werden) ist abhängig von:

1. der Art der Bereitung (Höhe des Wasserzusatzes),
2. der Art und Energie des Mischens und
3. der Art der Verarbeitung.

Um zu ermitteln, in welchem Grade die Dichte von Mörteln mit Silikatzuschlägen durch die Art der Bereitung, die durch den Wasserzusatz bedingt ist, beeinflußt wird, wurden folgende Versuche angestellt:

Aus Kalkteig, Normalsand und Si-Stoff wurden im Verhältnis 1:4:0,5 nach Gewichtsteilen Mörtel im erdfeuchten und mauergerechten Zustande bereitet und aus diesen Mörteln Druckproben durch Einschlagen bezw. Einfüllen des Mörtels in die Formen hergestellt. Die Prüfung dieser Körper nach 7, 28 und 90 Tagen Luftlagerung auf Raumgewicht und Festigkeit lieferte die in Tab. 20 verzeichneten Ergebnisse.

Tab. 20. **Ergebnisse der Prüfung von Kalkmörtel mit Si-Stoff-Zusatz auf Raumgewicht und Druckfestigkeit.**

Mittelwerte aus je fünf Einzelversuchen.

Mörtelmischung (Gewichtsteile)	Art der Proben-anfertigung	3	7	28	90	Verhältniszahlen; Werte der erdfeucht eingeschlagenen Proben = 100			
		Tage alte Proben				3 Tage	7 Tage	28 Tage	90 Tage
		Raumgewichte g/ccm							
1 Kalkteig[2]) + 4 Normalsand + 0,5 Si-Stoff	Erdfeucht eingeschlagen	2,048	1,992	1,946	1,915	100	100	100	100
	Mauergerecht eingefüllt	1,887	1,786	1,682	1,654	92	90	86	86
		Druckfestigkeit kg/qcm							
	Erdfeucht eingeschlagen	—	93,3	90,0	73,2	—	100	100	100
	Mauergerecht eingefüllt	—	27,3	26,0	18,8	—	29	29	26

Daß die eingefüllten Proben aus dem mit höherem Wasserzusatz (mauergerecht) angemachten Mörtel geringere Raumgewichte aufweisen würden, als die aus

[1]) Martens, Betrachtungen über Zementmörtel und Beton. Mitt. Materialpr.-Amt 1897. S. 89 ff.

[2]) Analyse des Kalkes, bezogen auf den ausgeglühten Zustand: Kieselsäure 2,60 %, Eisenoxyd und Tonerde 1,20 %, Kalk 96,16 %, Rest (Alkalien und Magnesia) 0,04 %.



erdfeuchtem Mörtel hergestellten, war vorauszusehen und wird durch das Ergebnis der Raumgewichtsbestimmung bestätigt. Noch deutlicher kommt aber die Wirkung der verschiedenen Bereitungsweise in dem Unterschied der Festigkeit der beiden Mörtelarten zum Ausdrucke (siehe Fig. 8). Wie aus den gewonnenen Zahlen hervorgeht, erreicht der mauergerecht angemachte Mörtel noch nicht ein Drittel der Festigkeit des erdfeucht bereiteten. (Siehe Verhältniszahlen Tab. 20.)

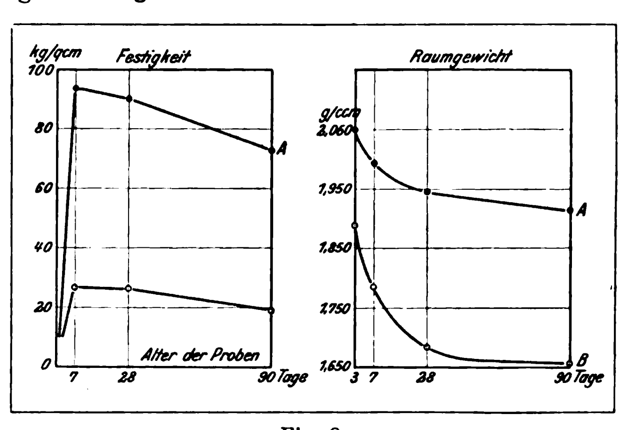


Fig. 8.
Raumgewicht und Druckfestigkeit der Mörtel nach Tab. 20.
• Feucht eingeschlagene Farbe (A).
o Mauergerecht eingefüllte Proben (B).

Diese Ergebnisse dürften den Einfluß des Wasserzusatzes oder der damit unmittelbar zusammenhängenden Art der Mörtelbereitung auf die Erhärtung der in Rede stehenden Mörtel zur Genüge beweisen.

Gesteigerte mechanische Verdichtung, die nur infolge des geringen Wasserzusatzes ermöglicht wird, bedeutet demnach gerade für die Mörtel mit hydraulischen Zuschlägen Erhöhung der Erhärtungsfähigkeit (Festigkeit). Andererseits bedeutet Steigerung des Wasserzusatzes Verminderung der Festigkeit insofern, als sehr wasserreich angemachter Mörtel, der infolge des überschüssigen Wassers seine höchste Dichte erreicht hat, durch Einschlagen nicht weiter verdichtet werden kann, wie dies bei erdfeuchtem Mörtel möglich ist, und außerdem das Wasser, soweit es nicht zur Erhärtung verbraucht wird, beim Verdunsten im Bindemittel selbst und im Mörtel kleine Poren zurückläßt, die diesen undicht und somit weniger widerstandsfähig machen.

Ebenso wie die Höhe des Wasserzusatzes ist auch die Mischart von Einfluß auf die Mörtelfestigkeit. Von dem Wassergehalt hängt nämlich das Maß der aufzuwendenden Mischarbeit wesentlich ab. Dickbreiig oder, wie bei den Mörtelprüfungen üblich, erdfeucht angemachte Mörtel, bedürfen zur Erlangung gleichmäßiger Beschaffenheit besserer Durcharbeitung als dünnflüssige. Erstere müssen nötigenfalls mittelst maschineller Vorrichtungen durchgearbeitet und durchgeknetet werden, welche Art der Bearbeitung die Umhüllung der Sand- oder sonstigen Zuschlagkörner mit Bindemittel bekanntlich äußerst günstig beeinflußt.

Die Art der Verarbeitung ist für die Dichtigkeitsverhältnisse der Mörtel insofern von Bedeutung, als bei Verwendung von porösen Steinen der Mörtel nasser angemacht werden muß als in Fällen, in denen Steinmaterial mit dichtem Gefüge vermauert wird.

Schließlich spielt auch hinsichtlich der Dichtigkeitsverhältnisse der durch die aufliegenden Mauerschichten auf die Mörtelfuge ausgeübte Druck eine gewisse Rolle.

Einfluß der Art der Erhärtung. Von tief einschneidender Bedeutung für die Erhärtungsfähigkeit und damit für die später zu erlangende Festigkeit der Mörtel mit hydraulischen Zuschlägen sind die Bedingungen, unter denen solche Mörtel erhärten.

Mörtel, deren Bindemittel aus Kalkhydrat und hydraulischen (puzzolanartigen oder silikatischen) Zuschlägen besteht, besitzen als solche die Fähigkeit, unter

Wasser selbständig zu erhärten, d. h. im Wasser beständig zu sein und mit fortschreitendem Alter an Festigkeit zuzunehmen. Sie werden als hydraulische oder Wassermörtel bezeichnet. Die Wassererhärtung dieser Mörtel ist bekannt und durch zahllose Versuche bestätigt. Geringere Erfahrungen liegen jedoch hinsichtlich des Verhaltens solcher Mörtel bei mangelnder Wasserzufuhr oder ständiger Luftlagerung oder gar bei völligem Wasserabschluß vor. Unter solchen Verhältnissen zeigen die Mörtel wesentlich anderes Verhalten.

Tatsache ist, daß Mörtel aus Kalk und Santorinerde, die bei Lagerung unter Wasser große Härte und Festigkeit erlangen können, bei Lagerung an der Luft ihren Zusammenhang einbüßen und zerfallen[1]), wenn ihnen nicht gelegentlich Feuchtigkeit zugeführt wird.

Ähnliche Beobachtungen hat man bei Traß-Kalkmörteln gemacht. Bei vergleichenden Versuchen mit solchen Mörteln, die an der Luft und unter Wasser erhärteten, wurde festgestellt, daß die ersteren anfänglich größere Festigkeit aufwiesen als die letzteren, daß jedoch bei fortschreitendem Alter die Luftproben wenig oder gar nicht an Festigkeit zunahmen oder schließlich sogar in der Festigkeit zurückgingen, während die Wasserproben stetig an Festigkeit zunahmen.

Ergebnisse solcher Versuche sind in den „Mitteilungen aus dem Kgl. Materialprüfungsamt“ 1900[2]) und 1901[3]) veröffentlicht. Die Mittelwerte einer größeren Versuchsreihe sind in Tabelle 21 wiedergegeben.

Tab. 21. **Einfluß der Art der Erhärtung auf die Festigkeit von Traß-Kalk-Mörtel.**

Ergebnisse der Prüfung des Mörtels aus 1 Raumteil Kalkteig + 1½ Raumteil Traßmehl + 1½ Raumteil Sand auf Zug- und Druckfestigkeit.

Mittelwerte aus je 10 Einzelversuchen.

Art der Erhärtung	Art der Bearbeitung des Mörtels	Zugfestigkeit in kg/qcm nach					Druckfestigkeit in kg/qcm nach				
		1 Woche	4 Wochen	12 Wochen	24 Wochen	1 Jahr	1 Woche	4 Wochen	12 Wochen	24 Wochen	1 Jahr
An der Luft	Mit der Kelle gemischt	4,4	5,9	6,5	6,6	7,0	34,1	77,4	96,4	103,6	100,9
3 Tage an der Luft, dann unter Wasser	Mit der Kelle gemischt	2,3	7,2	9,7	16,2	19,7	24,9	76,1	110,5	139,4	171,9
An der Luft	Im Walzwerk gemischt	3,4	4,7	5,7	—	5,5	25,2	45,2	49,0	—	48,4
3 Tage an der Luft, dann unter Wasser	Im Walzwerk gemischt	1,6	7,1	12,7	—	22,3	17,5	55,9	99,9	—	150,4
An der Luft	Nach vorheriger Zerkleinerung des Sandes mit der Walze gemischt	3,5	4,4	5,5	6,6	6,3	18,7	44,0	66,0	50,3	57,3
3 Tage an der Luft, dann unter Wasser	Nach vorheriger Zerkleinerung des Sandes mit der Walze gemischt	1,6	6,1	11,9	16,3	19,5	13,8	40,5	81,4	106,7	132,8

[1]) Feichtinger, Die chemische Technologie der Mörtelmaterialien. 1885. S. 85 und 205.

[2]) Mitt. Materialpr.-Amt 1900. Heft 4. S. 207 u. 225.

[3]) Mitt. Materialpr.-Amt 1901. Heft 2. S. 85.

Eine weitere umfangreiche Reihe im Materialprüfungsamt ausgeführter Versuche ist kürzlich zum Abschluß gelangt und beweist ebenso wie die früheren Versuche deutlich den Einfluß verschiedenartiger Lagerung auf die Festigkeit von Traß-Kalkmörtel.

Auf die ungünstige Wirkung ungenügenden Feuchthaltens habe ich bereits bei Gelegenheit der Veröffentlichung [1]) oben erwähnter Versuche aufmerksam gemacht und die mangelhafte Erhärtung bezw. den geringen Festigkeitsfortschritt der Kalk-Traßmörtel bei Luftlagerung (und mangelnder Wasserzufuhr) damit erklärt, daß die Erhärtung dieses Mörtels auf der Bindung der im Traß enthaltenen löslichen Kieselsäure mit dem Kalkhydrat zu Kalkhydrosilikat beruht. Diese Bindung kann sich bekanntlich nur bei Gegenwart von Feuchtigkeit — im trockenen Zustande wirken Kalkhydrat und Kieselsäure nicht aufeinander — vollziehen; bei zu geringer Feuchtigkeitszufuhr geht sie nur mangelhaft oder gar nicht vor sich.

Der Rückgang der sogenannten „lockeren" Mörtel in der Festigkeit mit zunehmendem Alter fand eine Erklärung in der von von Fuchs [2]) aufgestellten Theorie über das Verhalten hydraulischer Mörtel bei Luftlagerung, nach der die Kohlensäure der Luft unter gewissen Verhältnissen die Zersetzung eines hydraulischen Mörtels bewirken kann, indem

„die Kohlensäure, welche in die löcherige poröse Masse überall eindringen kann, sich allmählich des Kalkes bomächtigt und die Kieselsäure ausgeschieden und somit der Zusammenhang ganz aufgehoben wird."

Diese Anschauung wurde früher auch von Michaelis [3]) geteilt, der sich über die Einwirkung der Kohlensäure s. Z. wie folgt äußerte:

„Die Kohlensäure erzeugt überall da, wo sie mit Kalkhydrat oder mit kieselsauren Kalk in Berührung kommt, kohlensauren Kalk, wo sie mit kieselsaurem Alkali zusammentrifft, kohlensaures Alkali; sie scheidet also in beiden Fällen Kieselsäure aus.

Daß die aus erhärtetem Kalksilikat ausgeschiedene Kieselsäure nicht verkittend wirken kann, leuchtet ein, denn in dieser Verbindung ist sie schon, wenn wir uns so ausdrücken dürfen, morphologisch organisiert, d. h. schon in fester, bestimmter Form vorhanden; sie kann ihren Platz nicht mehr verändern, nicht mehr beweglich werden, und also auch nicht die Moleküle von kohlensaurem Kalk verkitten."

Auch Dr. Passow [4]) hat den zersetzenden Einfluß der Kohlensäure auf Zementmörtel und -beton beobachtet, jedoch nur dann, wenn der Mörtel oder Beton ungenügend gestampft und daher zu locker war.

Nur bei Bindemittel mit günstiger physikalischer Beschaffenheit, d. h. solchen von großer Dichte, wie sie namentlich der Portland-Zement besitzt, hält Michaelis die sich infolge Zersetzung durch Kohlensäure ausscheidende Kieselsäure für günstig zur Erhärtung bei Luftlagerung,

„weil die solcher Art ausgeschiedene Kieselsäure sich niederschlägt und die sich ihr anhaftenden Teilchen sehr energisch verkittet.

„Kein hydraulischer Mörtel besitzt eine solche Dichtigkeit wie der Portlandzement, keiner vermag folglich der Zersetzung durch die Kohlensäure besser Widerstand zu leisten und unsere früher aufgestellte Behauptung, daß die Härte und Widerstandsfähigkeit, welche der mit Wasser angemachte Zement erlange, mit der Dichtigkeit der gebrannten Masse in geradem Verhältnis stehe, erweist sich als vollkommen begründet; je weniger dicht die Masse nach dem Brennen ist (immer innerhalb der zulässigen Grenzen), desto weniger vollkommen ist die durch den kohlensauren Kalk und durch die abgeschiedene Kieselsäure be-

1) Mitt. Materialpr.-Amt 1900. S. 207 u. 225 und 1901. S. 85.

2) Feichtinger, Die chemische Technologie der Mörtelmaterialien. 1885. S. 205.

3) Michaelis, Die hydraulischen Mörtel. S. 37.

4) Dr. Passow, Über die Einwirkung der Kohlensäure auf Zementmörtel. Protokoll der Verhandlungen des Vereins deutscher Portlandzement-Fabrikanten. 1896. S. 128 ff.



wirkte Verkittung und desto tiefer wird die Zersetzung durch Kohlensäure und Wasser eingreifen."

Diese Auffassung stimmt mit den Erfahrungen überein, die auch im Materialprüfungsamt bei einer großen Reihe von Versuchen mit Mörteln aus Portland-Zement und verschiedenen puzzolanartigen Zuschlägen (Traß, Infusorienerde und Si-Stoff) gemacht wurden; denn diese Mörtel zeigten bis fünf Jahre Alter auch bei ausschließlicher Lufterhärtung, sogar in magerer Mischung 1 : 5 und 1 : 7 und bei Ersatz des Zementes durch genannte Zuschläge bis zu 20 % stetige Festigkeitszunahme. Über diese Versuche und deren Ergebnisse ist in den „Mitteilungen aus dem Kgl. Materialprüfungsamt" 1904, Heft 5 ausführlich berichtet.

Nach im Jahre 1902 mir zugegangener Mitteilung führt Michaelis das ungünstige Verhalten der „lockeren" Mörtel aus Kalk und Stoffen mit aufschließbarer Kieselsäure bei Luftlagerung lediglich auf das Schwinden der kolloidal gequollenen Kieselsäure beim Austrocknen zurück[1]).

Daß solches Schwinden bei Traß- und Kalkmörtel oder überhaupt bei Mörteln mit Kalkzusatz bei Luftlagerung eintreten kann und eintritt, ist nicht zu bezweifeln. Diese Tatsache schien auch eine gewisse Erklärung dafür zu sein, daß die sogenannten lockeren Mörtel bei Luftlagerung mangelhaftes Erhärten zeigen. Immerhin blieb es auffallend, daß die Mörtelproben, die für die Laboratoriumsversuche gewöhnlich mit sehr wenig Wasser (erdfeucht) eingeschlagen, also sehr stark verdichtet wurden, trotzdem nicht nur mangelhaft erhärteten, sondern sogar schließlich in der Festigkeit zurückgingen. Ein solcher andauernder Einfluß kann dem wahrscheinlich doch nur in der ersten Zeit der Erhärtung vor sich gehenden Schwinden der im hohen Grade mechanisch verdichteten Mörtel kaum zugeschrieben werden.

Um tieferen Einblick in diese Verhältnisse zu gewinnen und um insbesondere den Einfluß der Erhärtungsweise auf solche Mörtel mit hydraulischen Zuschlägen planmäßig festzustellen, wurden zunächst folgende Versuche ausgeführt:

Aus Kalkmörtel, bezogen von einem Berliner Mörtelwerk, und aus Mörtel, bestehend aus 100 Gewichtsteilen dieses Kalkmörtels und 5 Gewichtsteilen Si-Stoff, wurden Druckproben in der üblichen Weise hergestellt. Die Proben aus reinem Kalkmörtel erhärteten an der Luft; von den mit Si-Stoff versetzten Mörtelproben erhärteten je 5 Würfel:

a) an der Luft,
b) 3 Tage an der Luft, dann unter Wasser,
c) an der Luft, jedoch alle 7 Tage 1 Stunde lang unter Wasser,
d) 7 Tage an der Luft, dann unter Luftabschluß.

Der Kalkmörtel für diese Versuchsreihe hatte längere Zeit im Freien gelagert. Das zu den Versuchen verwendete Material wurde aus der Mitte des Mörtelhaufens nach vorsichtiger Entfernung der äußeren Schicht entnommen.

Die Prüfung der Körper erfolgte bei 14, 28 und 90 Tagen Alter.

Eine andere Reihe erstreckte sich auf Versuche, für die der Kalkmörtel von dem Werk frisch angeliefert war, nur mit dem Unterschiede, daß die Körper bei 14, 90 und 180 Tagen Alter geprüft wurden.

Die Ergebnisse der gesamten Prüfungen beider Reihen auf Druckfestigkeit sind in Tab. 22 als Mittelwerte zusammengefaßt und außerdem die für die Mörtel mit Si-Stoff-Zusatz gefundenen Werte in Fig. 9 zeichnerisch dargestellt.

[1]) Michaelis schreibt u. a.: „In den lockeren Mörteln ist die Kieselsäure bezw. das Kalkhydrosilikat mehr aufgequollen als in den dichten Mörteln und deshalb schwindet dieses Hydrat auch viel mehr und daher das ungünstige Verhalten an der Luft."



Tab. 22. Einfluß der Art der Lagerung (Erhärtung) auf den Festigkeitsfortschritt von Kalkmörtel mit Si-Stoff-Zusatz.

Ergebnisse der Prüfung von Kalkmörtel ohne und mit Si-Stoff-Zusatz auf Druckfestigkeit.

Mittelwerte aus je fünf Einzelversuchen.

Versuchsreihe	Art der Lagerung	An der Luft			3 Tage an der Luft, dann unter Wasser			An der Luft, jedoch alle 7 Tage 1 Stunde unter Wasser			7 Tage an der Luft, dann unter Luftabschluß		
	Mörtelmischung	Druckfestigkeit in kg/qcm nach											
		14 Tagen	28 Tagen	90 Tagen	14 Tagen	28 Tagen	90 Tagen	14 Tagen	28 Tagen	90 Tagen	14 Tagen	28 Tagen	90 Tagen
1	Kalkmörtel [1]) von einem Berliner Mörtelwerk	6,4	7,3	14,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	100 Gewichtsteile Kalkmörtel + 5 Gewichtsteile Si-Stoff	61,6	62,4	47,6	58,0	66,0	73,4	55,2	68,0	64,6	49,6	51,2	56,8
		14 Tagen	90 Tagen	180 Tagen	14 Tagen	90 Tagen	180 Tagen	14 Tagen	90 Tagen	180 Tagen	14 Tagen	90 Tagen	180 Tagen
2	Kalkmörtel [2]) von einem Berliner Mörtelwerk	7,6	17,2	21,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	100 Gewichtsteile Kalkmörtel + 5 Gewichtsteile Si-Stoff	33,8	23,3	20,5	27,3	32,6	37,4	25,7	32,8	29,9	31,2	34,9	38,2

[1]) Abgelagerter Kalkmörtel.

[2]) Frischer Kalkmörtel.

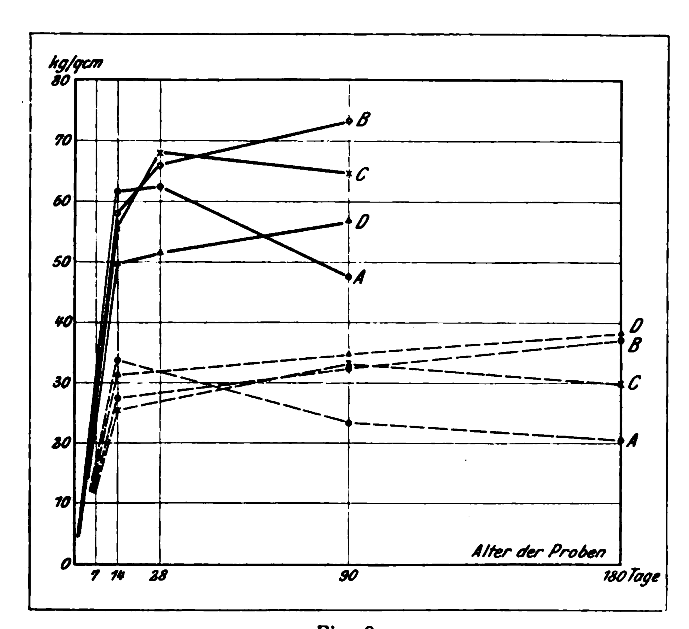


Fig. 9.

——— Versuchsreihe 1. — — — Versuchsreihe 2.

• Erhärtung an der Luft (*A*). o Erhärtung unter Wasser (*B*). × Erhärtung an der Luft mit zeitweiser Wasserlagerung (*C*). ▲ Erhärtung unter Luftabschluß.

Aus den Ergebnissen geht hervor, daß

1. der reine Kalkmörtel beider Reihen mit zunehmendem Alter in der Festigkeit stetig fortschreitet;
2. der Kalkmörtel mit Si-Stoffzusatz, abgesehen davon, daß er, wie auch schon bei den vorhergehenden Versuchen festgestellt, gegenüber dem reinen Kalkmörtel eine erhebliche Festigkeitserhöhung aufweist, bis 28 Tagen an Festigkeit zunimmt, dann aber bis zu 90 bezw. 180 Tagen in der Festigkeit zurückgeht, seine Erhärtungsfähigkeit also anscheinend einbüßt;
3. die Proben, die 3 Tage an der Luft und dann unter Wasser erhärteten, normal erhärteten, d. h. mit fortschreitendem Alter an Festigkeit zunehmen;
4. die Proben, die an der Luft lagerten, jedoch alle 7 Tage eine Stunde lang unter Wasser gesetzt wurden, bis zu 28 (Reihe 1) bezw. 90 Tagen (Reihe 2) an Festigkeit zunehmen und dann von da ab abnehmen, daß indes die Festigkeit bei 90 Tagen bezw. 180 Tagen erheblich höher ist, als die der gleichalterigen an der Luft erhärteten Proben, dagegen etwas niedriger, als die unter Wasser erhärteten Proben;
5. die Proben, die 7 Tage an der Luft und dann unter Luftabschluß lagerten, mit zunehmendem Alter in der Festigkeit fortschreiten und bei Reihe 1 sogar höhere Festigkeiten aufweisen, als die unter Wasser erhärteten Proben.

Nach diesen Ergebnissen und besonders in Anbetracht der daraus hervorgehenden Tatsache, daß die unter Luftabschluß, also vor der Wirkung der Kohlensäure geschützten, im übrigen aber ohne künstliche Feuchtigkeitszufuhr erhärteten Proben gleichmäßig bis zu 90 bezw. 180 Tagen an Festigkeit zunehmen, läßt sich der Schluß ziehen, daß die von v. Fuchs aufgestellte Theorie richtig zu sein scheint; denn, wie die Zahlen beweisen und auch der Verlauf der Schaulinien dartut, gehen die an der Luft erhärteten, also der Einwirkung der Kohlensäure ausgesetzten Proben in der Festigkeit zurück, während die unter Luftabschluß gelagerten Proben normal an Festigkeit zunehmen.

Obiger Prüfungsbefund bestätigt in gewisser Hinsicht die Ergebnisse von Untersuchungen, die bereits von Tetmajer[1]) mit Kalkmörteln über den „Einfluß des Wassers und der Kohlensäure auf die Bindekraft hydraulischer Bindemittel" ausgeführt hat. Er fand nämlich bei Lagerung in wasserfreier und kohlensäurefreier feuchter Luft höhere Festigkeiten, als bei gewöhnlicher Luftlagerung; dagegen fand er bei Lagerung in reiner Kohlensäure die höchsten Werte und bei Lagerung in kohlensäurereicher, aber verdünnter Luft (bei $+ 50^0$ C) die niedrigsten Werte. Analoge Erscheinungen traten bei den gleichen von ihm ausgeführten Versuchsreihen mit Roman-, Schlacken- und Portland-Zementen auf.

Längenänderung von Traßkalkmörtel bei Luft- und Wasserlagerung. Um allgemein einen Anhalt dafür zu gewinnen, in welchem Grade Traß-Kalkmörtel, der als typischer Vertreter der Wassermörtel mit hydraulischen Zuschlägen angesehen werden kann, bei Lagerung an der Luft schwindet und bei Wasserlagerung sich ausdehnt, wurden aus Mörtel nachstehender Mischungen

[1]) Mitteilungen der Anstalt zur Prüfung von Baumaterialien am eidgenössischen Polytechnikum in Zürich. 1894. Heft 7. S. 19.

a) $1^1/_2$ Gewichtsteile Traß + 1 Gewichtsteil Kalkpulver,
b) $1^1/_2$ „ „ + 1 „ „
+ $1^3/_4$ Gewichtsteile Sand,

die in erdfeuchter Steife angemacht waren, Prismen in der bekannten Größe durch Einschlagen des Mörtels in die Formen angefertigt.

Sämtliche Proben erhärteten zunächst 2 Tage in feuchter Luft; sodann wurde die halbe Anzahl unter Wasser gesetzt und die übrigen wurden im Laboratorium an der Luft aufbewahrt. Bei 3, 14, 28 Tagen, 3 Monaten, 6 Monaten, 1 Jahr, 3 und 5 Jahren Alter wurde die Länge der Prismen im Bauschingerschen Tasterapparat gemessen.

Absichtlich wurden außer der Sandmischung die Mischung aus reinem Bindemittel (Traß und Kalkpulver) zur Prüfung herangezogen, weil sich hierbei dessen Neigung zum Schwinden oder Ausdehnen (Quellen) am deutlichsten feststellen ließ. Aus dem gleichen Grunde wurde die Sandmörtelmischung so fett gewählt, daß mehr Bindemittel vorhanden war, als zur Ausfüllung der Hohlräume des Sandes nötig, so daß die Sandkörner völlig mit Bindemittel umhüllt waren. Auf diese Weise wurde auch dem etwaigen späteren Einwande begegnet, der Mörtel sei zu mager und infolgedessen sein Schwinden oder vielmehr das des Bindemittels nicht mehr durch Messungen feststellbar gewesen.

Tab. 23. **Einfluß der Luftlagerung auf die Längenänderung von Traßkalkmörtel bei verschiedenem Wasserzusatz.**

Physikalische Eigenschaften der Mörtelstoffe.

Mörtelstoff	Gewicht für 1 l eingelaufen R_f kg	Gewicht für 1 l eingerüttelt R_r kg	Spezifisches Gewicht s	Dichtigkeitsgrad $d = \frac{R_r}{s}$	Undichtigkeitsgrad $u = 1 - d$	Korngröße (Mahlfeinheit): Rückstand %	auf den Sieben mit der übergeschriebenen Anzahl Maschen auf 1 qcm: 1	4	9	20	60	120	324	600	900	5000	S
Traß	0,837	1,338	2,273 2,304[1])	0,588	0,412	Auf den Sieben	—	—	—	—	—	0,0	2,4	6,9	8,0	32,0	—
						Zwischen je 2 Sieben		—	—	—	—	0,0	2,4	4,5	1,1	24,0	68,0
Kalkpulver[2])	0,393	0,681	—	—	—	Auf den Sieben	—	—	—	—	—	0,0	0,8	2,4	4,0	12,0	—
						Zwischen je 2 Sieben		—	—	—	—	0,0	0,8	1,6	1,6	8,0	88,0
Bausand[3])	1,641	1,910	2,655	0,719	0,281	Auf den Sieben	—	0,0	0,8	6,0	25,5	44,5	75,5	—	92,5	—	—
						Zwischen je 2 Sieben		0,0	0,8	5,2	19,5	19,0	31,0	—	17,0	—	7,5

[1]) Nach dem Trocknen bei + 98°. Der Gehalt des Trasses an hygroskopischem Wasser betrug: 2,96%, an Hydratwasser: 8,31%.

[2]) Hergestellt aus gebranntem Stückkalk vom Zement- und Kalkwerk Bestwig A.-G. zu Bestwig i. W.

[3]) Glühverlust: 1,5%. Gehalt an abschlämmbaren Bestandteilen: 0,50%.

Die physikalischen Eigenschaften der verwendeten Mörtelstoffe sind in Tab. 23 und die Werte der Längenmessung in Tab. 24 verzeichnet. Die Siebrückstände sind außerdem in Fig. 10 und die mittleren Werte der Meßversuche in Fig. 11 zum Schaubilde aufgetragen. Aus dem Verlaufe der Schaulinien geht folgendes hervor:



Tab. 24. Ergebnisse der Prüfung von Traßkalkmörtel auf Längenänderung.

Mörtelmischung (Gewichtsteile)	Alter der Proben / Versuch Nr.	Längenunterschied in mm, bezogen auf die Länge der 3 Tage alten Proben, und zwischen je zwei Altersstufen: 14 Tage		28 Tage		3 Monate		6 Monate		1 Jahr		3 Jahre		5 Jahre	
		Gesamt	Zwischen je 2 Altersstufen	Gesamt	Zwischen je 2 Altersstufen	Gesamt	Zwischen je 2 Altersstufen	Gesamt	Zwischen je 2 Altersstufen	Gesamt	Zwischen je 2 Altersstufen	Gesamt	Zwischen je 2 Altersstufen	Gesamt	Zwischen je 2 Altersstufen
		Wasserlagerung[1]													
	1	+ 0,056	—	+ 0,055	— 0,001	+ 0,053	— 0,002	+ 0,086	+ 0,033	+ 0,090	+ 0,004	+ 0,083	— 0,007	+ 0,086	+ 0,003
	2	48	—	38	10	47	+ 0,009	77	30	80	3	79	1	92	13
	3	53	—	47	06	53	6	86	33	89	3	87	2	94	7
	4	Beim Entformen zerbrochen			—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	5	65	—	58	07	53	5	94	31	94	0	92	2	99	7
1½ Traß + 1 Kalkpulver	Mittel	**+ 0,056**	—	**+ 0,050**	**— 0,006**	**+ 0,054**	**+ 0,005**	**+ 0,086**	**+ 0,032**	**+ 0,088**	**+ 0,003**	**+ 0,085**	**— 0,003**	**+ 0,093**	**+ 0,008**
		Luftlagerung[1]													
	1	— 0,124	—	— 0,145	— 0,021	— 0,165	— 0,020	— 0,149	+ 0,016	— 0,162	— 0,003	— 0,169	— 0,017	— 0,174	— 0,005
	2	159	—	202	43	234	32	225	09	232	7	250	18	256	6
	3	264	—	325	61	349	24	343	6	364	21	384	20	388	4
	4	270	—	325	55	348	23	343	5	362	19	384	22	388	4
	5	155	—	182	27	205	23	196	9	202	6	229	27	232	3
	Mittel	**— 0,194**	—	**— 0,236**	**— 0,041**	**— 0,260**	**— 0,024**	**— 0,251**	**+ 0,009**	**— 0,264**	**— 0,011**	**— 0,283**	**— 0,021**	**— 0,288**	**— 0,005**
		Wasserlagerung[1]													
	1	+ 0,019	—	+ 0,020	+ 0,002	+ 0,023	+ 0,002	+ 0,047	+ 0,024	+ 0,048	+ 0,001	+ 0,035	— 0,013	+ 0,039	+ 0,004
	2	15	—	19	4	24	5	43	19	46	1	36	10	38	2
	3	15	—	21	6	23	2	42	19	44	2	34	10	32	2
	4	21	—	23	2	26	3	48	22	50	2	36	14	53	17
	5	Beim Entformen beschädigt			—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1½ Traß + 1 Kalkpulver + 1¾ Sand	Mittel	**+ 0,018**	—	**+ 0,021**	**+ 0,004**	**+ 0,024**	**+ 0,003**	**+ 0,045**	**+ 0,021**	**+ 0,047**	**+ 0,002**	**+ 0,035**	**— 0,012**	**+ 0,041**	**+ 0,005**
		Luftlagerung[1]													
	1	— 0,019	—	— 0,016	+ 0,003	— 0,019	— 0,003	— 0,017	+ 0,007	— 0,011	— 0,004	— 0,017	— 0,006	— 0,019	— 0,002
	2	31	—	26	5	33	7	27	6	31	4	56	25	56	0
	3	39	—	39	0	41	2	36	5	39	3	61	22	63	2
	4	40	—	40	0	45	5	40	5	49	9	66	17	71	5
	5	23	—	25	2	28	3	15	13	17	2	21	14	31	0
	Mittel	**— 0,030**	—	**— 0,029**	**+ 0,002**	**— 0,033**	**— 0,004**	**— 0,026**	**+ 0,007**	**— 0,030**	**— 0,004**	**— 0,046**	**— 0,017**	**— 0,048**	**— 0,002**

[1]) Sämtliche Proben lagerten die ersten drei Tage in Kästen mit feucht gehaltener Luft und dann die für die Wasserlagerung bestimmten Proben unter Wasser von durchschnittlich 17° C., die übrigen im Probenlager an der Luft bei Zimmerwärme.

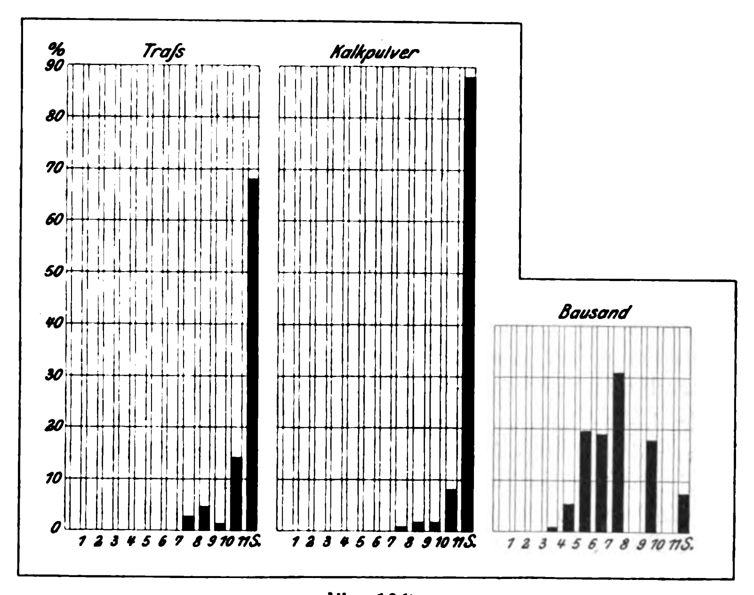


Fig. 10[1]).

Darstellung der Ergebnisse der Siebversuche (Rückstände zwischen je zwei Sieben). (Nach Tab. 23.)

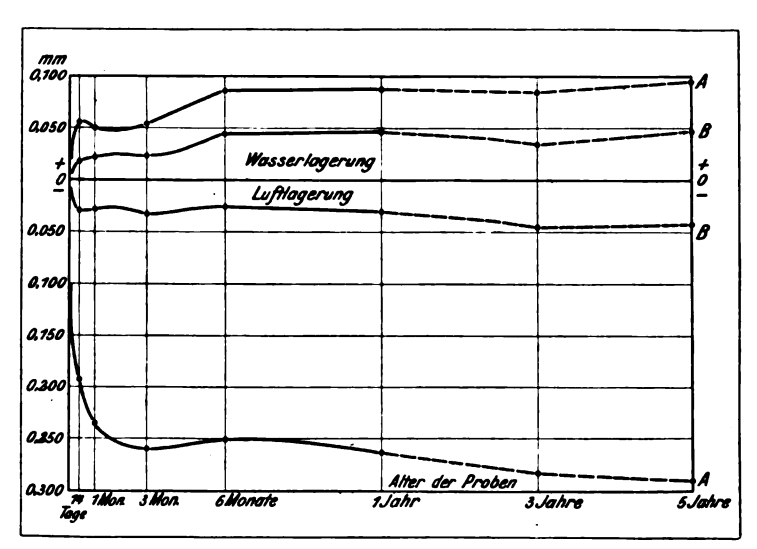


Fig. 11[2]).

Verlauf der Längenänderung von Traßkalkmörtel bei Luft- und Wasserlagerung. (Nach Tab. 24.)

A = Mischung aus $1^1/_2$ Traß + 1 Kalkpulver. B = Mischung aus $1^1/_2$ Traß + 1 Kalkpulver + $1^3/_4$ Sand.

---

[1]) Zeichendeutung siehe Fußbemerkung zu Fig. 1. S. 18.

[2]) In der Figur sind die Schaulinien von 1 Jahr Alter der Proben an gestrichelt gezeichnet, weil die Längenwerte von diesem Zeitpunkt an in anderem Maßstabe aufgetragen sind, als die vorherigen.

1. Die Mörtel nehmen bei Wasserlagerung an Länge zu und bei Luftlagerung ab, und zwar das reine Gemisch aus Traß und Kalk mehr, als der Mörtel mit Sand.
2. Die Längenänderung nach der einen, wie nach der anderen Richtung hat anscheinend bei sechs Monat Alter ihr Ende erreicht; wenigstens ist eine nennenswerte Steigerung der Längenab- oder -zunahme von diesem Zeitpunkt an nicht mehr eingetreten. Zwischen 1 Jahr und 3 Jahren zeigen sogar die Wasserproben Schwindneigung. (Die Versuche werden fortgesetzt.)
3. Die Längenabnahme (Schwinden) des reinen Bindestoffgemisches bei Luftlagerung ist erheblich größer, als die Längenzunahme bei Wasserlagerung. Bei dem Sandmörtel ist der Grad des Schwindens und Ausdehnens annähernd gleich.

Diese Ergebnisse beweisen allerdings, daß die „lockeren" Mörtel bei der Luftlagerung je nach dem Fettigkeitsgrade mehr oder weniger schwinden, daß indessen die Schwindneigung, wenigstens bei den für die Praxis in Betracht kommenden Mischungsverhältnissen, schon in kurzer Zeit, im vorliegenden Falle im wesentlichen schon nach 14 Tagen, beendet ist (die Körper aus der Sandmörtelmischung zeigen bei 1 Jahr Alter den gleichen Längenunterschied, wie bei 14 Tagen Alter). Dieser Befund würde also zwar das oben gekennzeichnete Verhalten der Traß-Kalk- oder ähnlicher Mörtel mit hydraulischen Zuschlägen bei Luftlagerung, d. h. deren geringen Festigkeitsfortschritt und schließlichen Erhärtungsstillstand bei gewissem Alter im Falle mangelnder Wasserzufuhr erklären, nicht aber den Festigkeitsrückschritt bei höherem Alter; denn mit dem Aufhören des Schwindens könnte doch das Fortschreiten der Erhärtung, d. h. die Festigkeitszunahme beendet sein. Der spätere stetige Festigkeitsrückgang, der nur Folge der Lockerung, und zwar einer mit dem Alter zunehmenden Lockerung des Zusammenhanges der Mörtel sein kann, kann indessen nicht mit dem vorher eingetretenen Schwinden (bei jüngerem Alter) erklärt werden.

Sprechen also auf der einen Seite die Ergebnisse der Längenmessungen nicht für die Richtigkeit der Ansicht, daß der Festigkeitsrückgang die Folge des Schwindens ist, so spricht auf der anderen Seite eine bekannte, den Tonen und ähnlichen Stoffen eigentümliche Eigenschaft geradezu gegen sie.

Bekanntlich gehen Tone und andere aus gewissen Gesteinen gewonnene Steinpulver, die die Fähigkeit besitzen, durch Bindung mit Wasser plastisch[1]) zu werden, wenn sie mit einer bestimmten Menge Wasser zu einem zähen Teig angemacht werden, beim Lagern an der Luft allmählich infolge Wasserabgabe (ohne Rißbildung) in eine starre feste Form über, die an Rauminhalt von der im früheren plastischen Zustande mehr oder weniger, zum Teil sogar sehr erheblich, abweicht. Man nennt diese Raumänderung „Schwinden" und den Grad der Fähigkeit, in den Trockenzustand überzugehen, „Schwindvermögen".

Bei diesem Vorgange büßen die Stoffe indessen nichts an ihrem (mechanischen) Zusammenhange oder ihrer Festigkeit ein, im Gegenteil erlangen sie je nach ihrem Verkittungsvermögen[2]) mehr oder minder hohe, einige sogar sehr beträchtliche

[1]) B. Zschokke, Untersuchungen über die Plastizität der Tone. Baumaterialienkunde. 7. Jahrg. 1902. Heft 24 u. 25/26 und 8. Jahrg. 1903. Heft 1/2, 3/4 u. 5/6 und „The useful properties of clays". United States Department of Agriculture. Bureau of Chemistry. Circular Nr. 17. 1904. Government Printing Office Washington.

[2]) The cementing power of road material. United States Department of Agriculture. Bureau of Chemistry. Circular Nr. 15. 1904.

Festigkeiten. Wir werden diese Tatsache durch die in dem zweiten Abschnitte mitgeteilten Ergebnisse der Festigkeitsversuche mit Ton- und Lehmmörtel bestätigt finden.

Nun lassen sich Kalktraßgemische im feuchten Zustande ebenfalls als solche plastische Stoffe ansprechen [1]), deren Bildsamkeit (Plastizität) die Folge der Vorhandenseins gewisser kolloidaler Teilchen ist [2]).

Man müßte also erwarten, daß Kalktraßmörtel ebenso wie Tone usw. beim Lagern an der Luft nicht ihre Festigkeit einbüßen, vielmehr infolge des Eintrocknens und der hierbei in Wirkung tretenden Verdichtung und Verkittung ihren Zusammenhang beibehalten oder gar vermehren. Da sie dies nach den bei den Versuchen gemachten Beobachtungen nicht tun, sondern bei einem bestimmten Alter in der Festigkeit zurückgehen, läßt sich vermuten, daß diese Erscheinung nicht auf dem physikalischen Vorgange des Schwindens, sondern auf einem anderen, und zwar chemischen, der Wirkung der Luft zuzuschreibenden Vorgange beruht, der zunächst Stillstand in der Erhärtung und durch allmähliche Lockerung des inneren Zusammenhanges der Massenteilchen später Rückgang der Festigkeit bis zu einem gewissen Grade herbeiführt.

Welcher Art aber auch die Ursachen des mangelhaften Erhärtens der im vorliegenden Falle geprüften und auch anderer hydraulischer Mörtel bei Lagerung an der Luft sein mögen, ob chemischer oder physikalischer Natur, d. h. ob tatsächlich die zersetzende Wirkung der Kohlensäure oder ob das Schwinden der kolloidal gequollenen Kieselsäure den Festigkeitsrückgang herbeiführt — jedenfalls ist durch die Prüfungsbefunde zweifelsfrei festgelegt,

> daß die „lockeren" Mörtel, wenn auch nicht der beständigen, so doch der vorübergehenden Wasserzufuhr zu ihrer Erhaltung und normalen Erhärtung, mit anderen Worten zur beständigen Festigkeitszunahme, bedürfen.

Die oben erwähnten Versuche mit Mörteln aus Basaltmehl und Vulkansand haben allerdings — wenigstens innerhalb der zur Prüfung gelangten Beobachtungszeit (1 Jahr) — insofern günstigere Ergebnisse geliefert, als diese Mörtel bis zu einem Jahre stetig an Festigkeit zunahmen. Dies läßt sich vielleicht damit erklären, daß die Art, wie die Kieselsäure in dem Zuschlagstoff vorhanden ist, für das Verhalten bei der Erhärtung von einschneidender Bedeutung ist; andererseits stehen sie aber im Einklange mit der Ansicht von Michaelis und auch der bisher gemachten Erfahrung, daß die „dichten" Mörtel (Zementmörtel) solches Verhalten nicht zeigen; denn bekanntlich erhärten Zementmörtel oder mit Zementzuschlag versetzte Mörtel (verlängerte Zementmörtel usw.) auch an der Luft außerordentlich günstig.

Dies beweisen die Ergebnisse der umfangreichen Versuche von Dyckerhoff [3]), Böhme [4]), Wolff [5]) und anderen Forschern.

---

[1]) Daß Kalktraßmörtel mit dem Wasserzusatz, der ihnen im allgemeinen zwecks Einschlagens in die Form zur Herstellung von Festigkeitskörpern gegeben wird, plastisch sind oder beim Einschlagen plastisch werden, dürfte jedem, der sich mit der Anfertigung solcher Probekörper beschäftigt hat, bekannt sein.

[2]) The useful properties of clays. U. S. Department of Agriculture. Bureau of Chemistry. Circular Nr. 87. 1904. Government Printing Office Washington.

[3]) Protokoll der Verhandlungen des Vereins deutscher Portlandzement-Fabrikanten. 1879. S. 44 und 1887. S. 63—65.

[4]) Böhme, Mitt. Materialpr.-Amt 1889. Ergänzungsheft 1 und Burchartz, Mitt. Materialpr.-Amt 1894. Heft 4.

[5]) Der Portlandzement und seine Anwendung im Bauwesen. 1905. S. 91.

Zur Erhärtung des Gesagten seien nachstehend die Ergebnisse einiger in der Abteilung für Baumaterialprüfung ausgeführten vergleichenden Festigkeitsversuche[1]) mit reinen Kalkmörteln und solchen mit Zementzusatz im Mittel angegeben (siehe Tab. 25 u. 26).

Tab. 25. **Festigkeit von reinen Kalkmörteln im Vergleich zu Kalkmörteln mit Zementzuschlag (verlängerten Zementmörteln)[2]).**

Mittelwerte aus je 10 Einzelversuchen.

Ursprung der Materialien	Mörtelmischung	Zugfestigkeit in kg/qcm nach			Druckfestigkeit in kg/qcm nach		
		28 Tagen	60 Tagen	90 Tagen	28 Tagen	60 Tagen	90 Tagen
Rüdersdorfer Kalk. Stern-Zement	1 Raumteil Kalkpulver + 2 „ Normalsand	1,92	4,20	—	5,3	7,6	—
	1 Raumteil Kalkpulver + 2 „ Normalsand + 0,15 „ Zement	3,48	6,33	—	14,7	29,7	—
	1 Raumteil Kalkpulver + 2 „ Normalsand + 0,18 „ Zement	4,20	7,13	—	24,6	37,6	—
	1 Raumteil Kalkpulver + 2 „ Normalsand + 0,20 „ Zement	4,68	7,75	—	25,2	37,3	—
Unbekannt	1 Gewichtsteil Kalkpulver + 4 „ Normalsand	2,56	6,35	7,70	11,8	24,4	32,5
	1 Gewichtsteil Kalkpulver + 4 „ Normalsand + 1/3 „ Zement	7,16	11,70	14,95	37,0	54,2	61,4
Unbekannt	1 Raumteil Kalkpulver + 5 „ Normalsand	2,92	3,27	4,80	19,1	21,3	26,4
	1 Raumteil Kalkpulver + 5 „ Normalsand + 1 „ Zement	13,93	15,75	17,15	126,9	165,4	179,6
	1 Raumteil Kalkpulver + 5 „ Normalsand + 1/2 „ Zement	5,35	6,25	7,45	52,5	73,4	85,8

1) Böhme, Mitt. Materialpr.-Amt 1889. Ergänzungsheft 1, und Burchartz, Mitt. Materialpr.-Amt 1894. Heft 4.

2) Die Probekörper erhärteten an der Luft.

Tab. 26. Festigkeit von reinen Kalkmörteln und von Kalkmörteln mit Zementzuschlag.

Mittelwerte aus je 10 Einzelversuchen.

Mörtelmischung in Gewichtsteilen	Zugfestigkeit in kg/qcm nach				Verhältniszahlen[1]) für			
	28 Tagen	1 Jahr	28 Tagen	1 Jahr	28 Tage	1 Jahr	28 Tage	1 Jahr
	Erhärtung an der Luft		Erhärtung unter Wasser		Erhärtung an der Luft		Erhärtung unter Wasser	
1 Rüdersdorfer Kalk + 10 Normalsand	2,55	2,73	0,82	1,85	100	100	100	100
1 Rüdersdorfer Kalk + 10 feiner vulk. Sand	10,20	13,15	9,65	24,40	100	100	100	100
1 Rüdersdorfer Kalk + 10 grober vulk. Sand	9,65	11,80	8,85	23,30	100	100	100	100
1 Rüdersdorfer Kalk + 10 Normalsand + 1 Zement	9,25	16,05	9,25	14,40	363	588	1127	778
1 Rüdersdorfer Kalk + 10 feiner vulk. Sand + 1 Zement	9,85	19,25	15,20	33,95	97	146	158	147
1 Rüdersdorfer Kalk + 10 grober vulk. Sand + 1 Zement	11,60	21,70	15,65	32,50	120	192	177	139

[1]) Die Festigkeiten der reinen Kalkmörtel sind = 100 gesetzt.

Auch Traß-Kalkmörtel werden durch Zementzusatz verbessert und für Lufterhärtung geeigneter gemacht, wie durch Versuche (Mitt. Materialpr.-Amt 1901. S. 69, 71 und 77) nachgewiesen worden ist.

Auf Grund der vorstehenden Betrachtungen, deren Ausgangspunkt die Donathsche Theorie von der Verwertung der Mörtelsande nach dem Gehalt an verbindungsfähiger Kieselsäure gewesen ist, lassen sich folgende allgemeine Schlüsse ziehen:

1. Die Donathsche Theorie wird dahin bestätigt, daß durch das Vorhandensein oder den Zusatz verbindungsfähiger Kieselsäure zum Kalkmörtel dessen Anfangserhärtung in hohem Grade beeinflußt, und zwar erhöht wird.
2. Der Grad der Festigkeitssteigerung ist erstens abhängig von dem Grade der Verdichtung der Mörtel, die ihrerseits wieder bedingt wird durch die Höhe des Wasserzusatzes, die Energie des Mischens und die Art der Verarbeitung, und zweitens von der Art und Weise, wie die Mörtel erhärten (an der Luft oder unter Wasser).
3. Unter Wasser erhärten alle mit hydraulischen Zuschlägen vermischten Kalkmörtel normal, d. h. ihre Festigkeit nimmt mit fortschreitendem Alter stetig zu.
4. Bei Luftlagerung ist die Anfangsfestigkeit höher als bei Wasserlagerung. Nach einer gewissen Erhärtungsdauer tritt bei den sogenannten lockeren Mörteln Stillstand und später Rückschritt in der Erhärtung und Festig-

keit ein. Durch auf lange Zeiträume ausgedehnte Versuche müßte nachgeprüft werden, wann der Rückgang aufhört[1]).

Die Festigkeit der Wasserproben bleibt zwar anfangs hinter der der Luftproben zurück, schreitet aber mit zunehmendem Alter fort und wird bald höher als die der Luftproben.

5. Die Ursachen des Verhaltens der Kalkmörtel mit hydraulischen Zuschlägen bei Luftlagerung sind noch nicht genau bekannt; sie können in der Wirkung der Kohlensäure der Luft auf die Kalkhydrosilikatverbindung (vorausgesetzt, daß eine solche besteht), in dem Schwinden des (lockeren) Mörtels oder in anderen bis jetzt noch nicht aufgeklärten Vorgängen begründet sein.
6. Der Zusatz von Portland-Zement zu den in Rede stehenden Mörteln übt in allen Fällen einen günstigen Einfluß auf die Erhärtungsenergie und den Erhärtungsverlauf aus.

Mit vorstehenden Versuchen kann und soll die Prüfung der Kalkmörtel mit hydraulischen Zuschlägen oder überhaupt mit Magerungsmitteln (Sanden), die leicht zersetzliche Silikate enthalten, in bezug auf Erhärtungsfähigkeit keineswegs abgeschlossen sein. Zu einem in dieser Beziehung maßgebenden Urteil wird man erst auf Grund von Versuchen gelangen, die sich auf genügend alte Proben erstrecken.

Verlängerter Zementmörtel. Wo Bausande zur Verfügung stehen, die verbindungsfähige Kieselsäure enthalten (Vulkansand, Schlackensand usw.) oder Sande aus Gesteinstrümmern von zeolithischem Charakter wird man selbstverständlich solche auch für Luftbauten den reinen Quarzsanden vorziehen; denn abgesehen von den Innenmauern der Bauwerke werden die Mauerteile meist mehr oder weniger mit Wasser oder Feuchtigkeit (Regen usw.) in Verbindung kommen, so daß die zur Erhärtung erforderlichen Bedingungen gegeben sind. In Fällen indessen, in denen es auf hohe Festigkeit ankommt oder wenigstens auf solche, die mit gewöhnlichem Kalkmörtel nicht erreichbar ist, in denen man aber andererseits die Festigkeit von reinem Zementmörtel nicht ausnutzen kann oder diesen aus ökonomischen Rücksichten nicht verwenden will, sollte man seine Zuflucht zu verlängertem Zementmörtel[2]) nehmen, der, wie wir gesehen haben, auch bei Luftlagerung zuverlässig erhärtet und bei richtiger Behandlung gute Festigkeiten liefert. Überhaupt sollte man in allen Fällen, in denen Kalkmörtel in Verbindung mit hydraulischen Zuschlagstoffen für Luftbauten verwendet werden, einen Zusatz von Portland-Zement geben, der, wenn er noch so gering ist, nicht nur erhebliche Festigkeitssteigerung, sondern auch gewisse Sicherheit für fortschreitende Erhärtung bietet.

Aus diesem Grunde empfiehlt auch Krone[3]) die Verwendung von Zementkalkmörtel (Kalkmörtel mit Zementzuschlag, d. i. verlängerter Zementmörtel) und

---

[1]) Zu einem gewissen Zeitpunkt wird der Rückgang der Festigkeit beendet sein. Nimmt man einerseits als Ursache der Festigkeitsabnahme die Zersetzung des etwa gebildeten Kalkhydrosilikates durch die Kohlensäure der Luft an, so ist es andererseits wohl als selbstverständlich anzusehen, daß der hierbei wieder freiwerdende Kalk in kohlensauren Kalk übergeht und auf diese Weise ein gewisser Zusammenhang des Mörtelkörpers gewahrt wird. Ist diese Umwandlung so weit vorgeschritten, daß sich eine dichte Schicht kohlensauren Kalkes gebildet hat und die Kohlensäure nicht mehr auf den Kern der Mörtelmasse wirken kann, so hört obiger Zersetzungsvorgang und damit der Festigkeitsrückschritt des Mörtels auf. Hierfür spricht das tadellose Verhalten von Kalktraßmörteln bei Luftbauten.

[2]) Verlängerter Zementmörtel. Tonindustrie-Zeitung 1903. Nr. 23. S. 293.

[3]) Betrachtungen über Mauerwerk mit verschiedenen Mörtelmaterialien. Deutsche Bauzeitung. 1899. S. 60—66.

Kalkzementmörtel (Zementmörtel mit Kalkzuschlag) vor reinen Kalkmörteln, die außer dem Mangel an genügender Festigkeit auch noch den Nachteil besitzen, daß sie stärkeres „Setzen" des Mauerwerks verursachen als Kalkmörtel, dem Zement zugesetzt ist.

Nußbaum[1]) rät allerdings auch von der Verwendung selbst auch solcher Mörtel zur Herstellung von Grundmauerwerk, dicken Mauern und überhaupt in Fällen, in denen der Luftzutritt zum Mörtel verhindert wird, ab. Auf diesen Punkt soll weiter unten zurückgekommen werden. Wir werden sehen, daß die verlängerten Zementmörtel auch unter Luftabschluß gut erhärten.

d) Einfluß der Art des Anmachewassers auf die Erhärtung von Luftkalkmörtel.

Daß schließlich die Art des Wassers[2]), mit dem entweder der Kalkteig abgelöscht oder der Mörtel angemacht wird, ebenfalls von Einfluß auf die Erhärtung der Luftkalkmörtel ist, dürfte nicht zweifelhaft und auch allgemein bekannt sein.

Lösch- oder Anmachewasser soll möglichst frei von (leicht löslichen) Salzen sein, da solche unter Umständen Auswitterungen hervorrufen können. Meerwasser enthält z. B. Kochsalz, das als Natriumkarbonat auswittert; nebenbei entsteht Chlorkalzium, ein sehr hygroskopisches Salz, das die Wände und Mauern feucht hält.

Zahlenmäßige Angaben über den Einfluß der Wasserart auf die Erhärtung von Luftkalkmörtel liegen nicht vor. Es fand sich leider auch bis jetzt keine Gelegenheit, Versuche nach dieser Richtung anzustellen.

e) Einfluß der Höhe des Sandzusatzes (Mischungsverhältnis) auf die Mörtelfestigkeit.

Die Erhärtung und Festigkeit des Kalkmörtels wird naturgemäß auch durch dessen mechanische Zusammensetzung, d. h. durch das Mischungsverhältnis von Bindemittel (Kalkteig oder Kalkpulver) zum Zuschlagmaterial (Sand) beeinflußt. Dieses Verhältnis soll, wie bei sonstigen Mörteln, auch bei normalem Kalkmörtel derart sein, daß sämtliche Hohlräume des Sandes mit Bindemittel (Kalkhydrat) in geringem Überschuß ausgefüllt sind. Geht der Kalkhydratzusatz im Mörtel unter eine gewisse Grenze herab, so wird der zur Erlangung gewisser Festigkeit nötige Zusammenhang beim sogenannten Anziehen (Abbinden) nicht erreicht werden können, da die Überbrückungen von Korn zu Korn fehlen würden. Dies ist für den Kalkmörtel um so wichtiger, als der Kalk (Kalkteig) im Mörtel nach dem Vermauern stark schwindet und der Kalk an sich nur geringes Haftvermögen besitzt.

Weiteres Schwinden tritt auch bei der Umwandlung des Kalkhydrats in kohlensauren Kalk ein; denn dieser hat ein größeres spezifisches Gewicht als jenes.

Nach Ziurecks[3]) Untersuchungen soll Kalkmörtel aus Luftkalk mindestens 10% CaO, d. i. 13% $Ca(OH_2)$[4]) aufweisen.

[1]) K. B. Lehmann und H. Chr. Nußbaum, Studien über Kalkmörtel und Mauerfeuchtigkeit. Archiv für Hygiene. Bd. 9. S. 139 u. 232 und Tonindustrie-Zeitung 1899. Nr. 109. S. 1438.

[2]) Feichtinger. 1885. S. 69.

[3]) Ziureck, Zeitschr. f. Bauwesen 1861. S. 55. Gottgetreu. 1881. S. 266 und Feichtinger. 1885. S. 69.

[4]) Dies entspricht annähernd dem Kalkgehalt guten Berliner Mauermörtels.

Ist es einerseits, wenn man guten Mörtel erzielen will, nicht ratsam, den Kalkzusatz zu gering zu bemessen, so ist doch andererseits die Verwendung von zuviel Bindemittel nicht zweckmäßig. Erstens empfiehlt sie sich nicht aus ökonomischen Rücksichten; zweitens wirkt zu hoher Kalkzusatz sogar schädlich, weil beim Eintrocknen (Abbinden) des Mörtels oder vielmehr des Kalkteigs nach dem Vermauern ein zu starkes Schwinden des Kalkbreies eintritt, infolgedessen nicht nur der Mörtel rissig, bröckelig und daher weniger widerstandsfähig wird, sondern auch zu starkes Setzen des Mauerwerks eintritt. Solcher zu fette Mörtel bleibt stets mürbe und wird auch bei der späteren Umwandlung des Kalkhydrats in kohlensauren Kalk nicht wesentlich fester[1]), da wie schon erwähnt hierbei weiteres Schwinden stattfindet.

Planmäßige Versuche darüber, welcher Sandzusatz zum abgelöschten Kalk der geeignetste ist, d. h. für welches Mischungsverhältnis die höchsten Mörtelfestigkeiten erzielt werden, lagen bis jetzt nicht vor.

Zur Feststellung des Einflusses der mechanischen Zusammensetzung bezw. der Höhe des Sandzusatzes auf die Festigkeit von Luftkalkmörtel wurden daher umfangreiche Versuchsreihen ausgeführt.

Die Untersuchung erstreckte sich auf vier Kalksorten, die aus Werken stammten, die nachweislich Luft-(Fett-)kalk erzeugen. Die Analyse bestätigte, daß es sich um gute (fette) Luftkalke handelte; denn ihr Ätzkalkgehalt schwankte zwischen 95,98 und 97,82 %.

Zwei Kalke wurden zu Kalkpulver und zwei zu Kalkteig abgelöscht. Als Zuschlagstoff wurden Sande verwendet, die lediglich aus Quarzsand bestanden und keine etwa hydraulische Erhärtung bewirkenden Bestandteile (lösliche Kieselsäure) enthielten. Die Festigkeitsversuche umfaßten in den vier Reihen den reinen Kalk und die Mischungen 1:1, 1:2, 1:3, 1:5 und 1:7, bei Reihe 3 außerdem die Mischung 1:4. Nur bei Versuchsreihe 1 wurde der reine Kalk nicht auf Festigkeit geprüft, weil bei Beginn dieser Reihe noch kein Verfahren bekannt war, mit Hilfe dessen geeignete Probekörper aus dem reinen Kalkhydrat für die Festigkeitsversuche hätten hergestellt werden können.

Die Herstellung der Mörtelmischungen und der Probekörper erfolgte in der üblichen Weise. Die Versuche wurden mit Ausnahme von Reihe 3, die sich nur auf Probekörper bis zu 6 Monaten Alter erstreckte, auf 1 Jahr alte Proben ausgedehnt.

Die Mörtelkörper lagerten im Laboratorium an der Luft.

Die Eigenschaften der verwendeten Mörtelstoffe sind in Tab. 27, die Ergebnisse der Raumgewichts- und Festigkeitsprüfungen als Durchschnittswerte aus je fünf Einzelversuchen in Tab. 28 (S. 56 und 57) und Tab. 29 (S. 62 und 63) zusammengefaßt.

---

[1]) H. Chr. Nußbaum, Die Erhärtung des Kalkmörtels. Beilage Nr. 33 zur Zeitschr. f. Architektur- u. Ingenieurwesen 1897. S. 406.



Tab. 27. Einfluß der Höhe des Sandzusatzes auf die Festigkeit von Luftkalk.

Eigenschaften der Mörtelstoffe.

Versuchsreihe	Mörtelstoff	Gewicht für 1 l eingelaufen R_f kg	Gewicht für 1 l eingerüttelt R_r kg	Spezifisches Gewicht s	Dichtigkeitsgrad $b = \frac{R_r}{s}$	Undichtigkeitsgrad $u = 1 - b$	Gehalt an abschlämmbaren Bestandteilen %	Korngröße: Rückstand in % auf den Sieben mit der übergeschriebenen Anzahl Maschen für 1 qcm: 4	9	20	60	120	324	900	5000	S
1 Kalk aus Hannover [1]	Kalk A. Kalkpulver [2]	0,418	0,708	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Mauersand [3]	1,492	1,795	2,439	0,480	0,520	0,30	0,0	0,1	0,2	1,8	13,0	31,5	92,5	—	7,5
2 Kalk aus Westfalen [4]	Kalk B. Kalkpulver [5]	0,413	0,687	—	—	—	—	—	—	—	—	0,0	1,0	10,0	16,0	84,0
	Mauersand [3]	1,561	1,846	2,646	0,698	0,302	0,66	0,0	0,2	0,6	2,0	6,0	25,0	59,0	—	41,0
3 Kalk aus Westfalen [4]	Kalk C. Kalkteig [6]	—	1,352	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Mauersand [3]	1,569	1,852	2,655	0,698	0,302	0,50	0,0	0,1	1,0	4,0	10,0	36,5	71,0	--	29,0
4 Kalk aus Westfalen [7]	Kalk D. Kalkteig [6]	—	1,288	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Berliner Mauersand [8]	1,525	1,805	2,645	0,682	0,318	—	—	—	0,0	10,0	23,0	61,0	91,0	—	9,0

[1]) Gehalt an Ätzkalk 95,89%.

[2]) Das Kalkpulver wurde 10 Tage nach dem Ablöschen und nach Absiebung auf dem 120-Maschensiebe zur Prüfung benützt.

[3]) Der Sand wurde getrocknet und auf dem 4-Maschensieb abgesiebt; sein Gehalt an löslicher Kieselsäure betrug 0,03% (Reihe 1).

[4]) Gehalt an Ätzkalk 97,82%.

[5]) Das Kalkpulver hatte 25 Tage gelagert und wurde vor der Prüfung auf dem 120-Maschensiebe abgesiebt.

[6]) Der Kalkteig hatte 28 Tage gelagert.

[7]) Gehalt an Ätzkalk 96,92%.

[8]) Der Sand wurde getrocknet und auf dem 20-Maschensieb abgesiebt. Das Siebgrobe wurde ausgehalten.

Tab. 28. **Raumgewichte der Mörtelkörper zu Tab. Nr. 29**[1].

Mittelwerte aus je fünf Einzelversuchen.

Mörtelmischung (Raumteile)[2]	Wasser-zusatz[3]	Zugproben (Normalformat)					Druckproben (Würfel von 7,1 cm Kantenlänge)				
		Raumgewicht g/ccm nach					Raumgewicht g/ccm nach				
	%	3 Tagen	28 Tagen	3 Monaten	6 Monaten	1 Jahr	3 Tagen	28 Tagen	3 Monaten	6 Monaten	1 Jahr
Reihe 2. Kalk B.											
Reiner Kalk (Pulver)	47,0	1,000	1,000	1,086	1,129	1,130	1,177	0,930	0,989	1,054	1,079
1 Kalkpulver + 1 Mauersand	12,0	2,086	1,943	1,986	2,014	2,000	1,955	1,780	1,811	1,837	1,848
1 Kalkpulver + 2 Mauersand	10,0	2,157	2,043	2,086	2,086	2,071	2,090	1,938	1,958	1,975	1,975
1 Kalkpulver + 3 Mauersand	8,0	2,086	2,000	2,014	2,014	2,000	2,056	1,930	1,947	1,955	1,955
1 Kalkpulver + 5 Mauersand	7,0	1,943	1,914	1,929	1,914	1,914	1,958	1,865	1,873	1,870	1,870
1 Kalkpulver + 7 Mauersand	6,0	1,886	1,871	1,871	1,871	1,857	1,910	1,834	1,837	1,834	1,831
Reihe 3. Kalk C.											
Reiner Kalk (Pulver)	38,5	1,029	1,043	1,043	1,043	—	1,127	0,938	0,937	0,994	—
1 Kalkteig + 1 Mauersand	12,2	1,886	1,857	1,886	1,886	—	1,975	1,772	1,797	1,817	—
1 Kalkteig + 2 Mauersand	9,2	2,029	2,029	2,057	2,057	—	2,090	1,966	1,986	2,000	—
1 Kalkteig + 3 Mauersand	8,0	2,029	2,029	2,029	2,029	—	1,975	1,924	1,938	1,941	—
1 Kalkteig + 4 Mauersand	5,8	1,971	1,971	1,971	1,986	—	1,932	1,890	1,901	1,901	—
1 Kalkteig + 5 Mauersand	4,5	1,929	1,929	1,929	1,943	—	1,899	1,865	1,870	1,870	—

[1]) Das Raumgewicht der Probekörper zu Reihe 1 wurde nicht bestimmt.

[2]) Den Raumteilen der Mörtelstoffe wurde als Einheitsgewicht für den Kalkteig das Litergewicht im eingerüttelten Zustande, für das Kalkpulver und den Sand das arithmetrische Mittel aus den Gewichten des eingelaufenen und eingerüttelten Liters zugrunde gelegt.

[3]) Der Wassergehalt (nicht -zusatz) der Mörtel mit Kalkteig wurde durch Abdampfen bestimmt.

Tabelle 28 (Fortsetzung)[1].

Mörtelmischung (Raumteile)[2]	Wasserzusatz[3]	Zugproben (Normalformat)					Druckproben (Würfel von 7,1 cm Kantenlänge)				
		Raumgewicht g/ccm nach					Raumgewicht g/ccm nach				
	%	3 Tagen	28 Tagen	3 Monaten	6 Monaten	1 Jahr	3 Tagen	28 Tagen	3 Monaten	6 Monaten	1 Jahr
Reihe 4. Kalk D.											
Reiner Kalk (Pulver)	45,0	0,943	0,900	0,943	0,943	0,971	1,099	0,856	0,910	0,935	0,963
1 Kalkteig + 1 Mauersand	11,1	1,971	1,871	1,914	1,914	1,929	2,014	1,794	1,820	1,837	1,851
1 Kalkteig + 2 Mauersand	7,4	2,086	2,029	2,043	2,057	2,057	2,085	1,932	1,949	1,961	1,972
1 Kalkteig + 3 Mauersand	6,7	1,943	1,957	1,943	1,957	1,957	1,961	1,870	1,882	1,887	1,890
1 Kalkteig + 5 Mauersand	4,8	1,857	1,857	1,857	1,871	1,857	1,834	1,803	1,806	1,806	1,797
1 Kalkteig + 7 Mauersand	4,7	1,829	1,829	1,814	1,829	1,814	1,831	1,775	1,775	1,772	1,763

1) 2) 3) Siehe die Anmerkungen auf S. 56.

Zu bemerken ist, daß bei Reihe 1 die Zugproben der Mischungen 1:5 und 1:7 bei der Lagerung allmählich zerfielen. Nur die 28-Tagsproben der Mischung 1:5 konnten noch für die Prüfung benutzt werden. Worauf der Zerfall dieser Probekörper zurückzuführen ist, konnte nicht mit Sicherheit festgestellt werden; vermutlich war mangelhafte Ablöschung des Kalkes (zu Kalkpulver) und hierdurch hervorgerufene Treibneigung die Ursache.

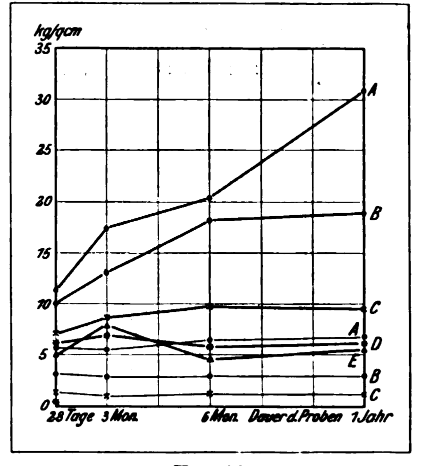


Fig. 12.
Einfluß des Sandzusatzes auf die Festigkeit von Luftkalk. Versuchsreihe 1. Kalk A (aus Hannover). Festigkeitswerte nach Tab. 29.
Zugfestigkeit. —— Druckfestigkeit.
A Mischung 1:1; *B* 1:2; *C* 1:3; *D* 1:5; *E* 1:7.

Zur besseren Anschauung sind die Festigkeitswerte für jede Reihe gesondert in den Figuren 12—15 aufgezeichnet. Zur übersichtlicheren Darstellung des Einflusses der Höhe des Sandzusatzes auf die Mörtelfestigkeit sind die Festigkeitswerte in Fig. 16 und 17 auch noch in der Weise dargestellt, daß die Mischungen als Abszissen und die Festigkeiten als Ordinaten aufgetragen sind. Ferner sind für die Mörtel aus den in Pulverform verarbeiteten Kalken die Mengen der Mörtelstoffe und des Hohlraumes in der Raumeinheit nach den Angaben von Martens (Mitt. Materialpr.-Amt 1897, S. 103—105) in Tab. 30 berechnet und die errechneten Werte nebst den Raumgewichts- (28 Tage) und Festigkeitswerten (28 Tage und 1 Jahr) in den Fig. 18 und 19 versinnlicht.

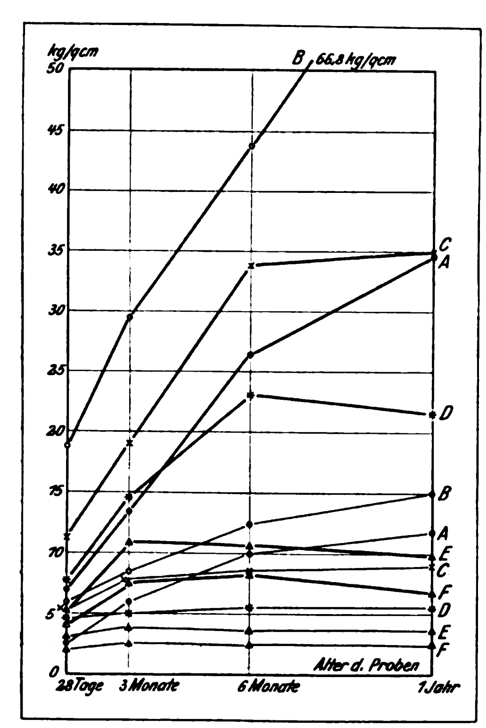


Fig. 13.
Einfluß des Sandzusatzes auf die Festigkeit von Luftkalk. Versuchsreihe 2. Kalk B (aus Westfalen). Festigkeitswerte nach Tab. 29.
– – Zugfestigkeit. —— Druckfestigkeit.
A Reiner Kalk. *B* Mischung 1 : 1; *C* 1 : 2; *D* 1 : 3; *E* 1 : 5; *F* 1 : 7.

Aus den Ergebnissen und dem Verlauf der Schaulinien lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

1. Die Festigkeit des reinen Kalkes wird durch Sandzusatz bis zu einem gewissen Mischungsverhältnis erhöht.
2. Der Einfluß des Mischungsverhältnisses ist bei den verschiedenen Kalken verschieden. Während z. B. bei Reihe 1 die Festigkeit des reinen Kalkes durch die Mischung 1 : 2 erreicht wird liegt diese Grenze in Reihe 3 bei Mischung 1 : 4 und in Reihe 4 zwischen den Mischungen 1 : 2 und 1 : 3.
3. Die höchste Festigkeitszunahme wird durch das Verhältnis 1 : 1 erzielt. Es ist nicht ausgeschlossen, daß bei einem Verhältnis zwischen 1 : 0 und 1 : 1 vielleicht eine noch höhere Festigkeitssteigerung erreicht worden wäre; doch wurden mit Rücksicht auf den bereits an und für sich

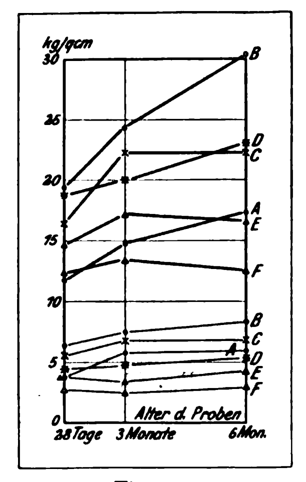


Fig. 14.
Einfluß des Sandzusatzes auf die Festigkeit von Luftkalk. Versuchsreihe 4. Kalk C (aus Westf.). Festigkeitswert n. Tab. 29.
–– Zugfestigkeit. —— Druckfestigkeit.
A Reiner Kalk. *B* Mischung 1 : 1; *C* 1 : 2; *D* 1 : 3; *E* 1 : 4; *F* 1 : 5.

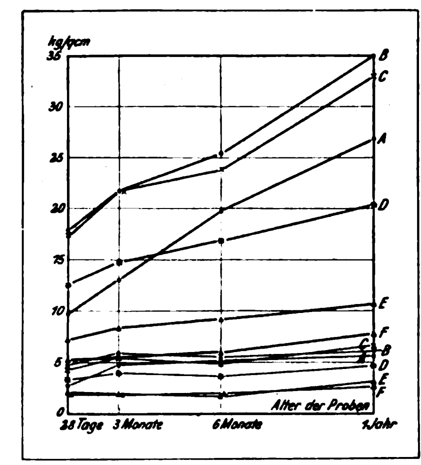


Fig. 15.
Einfluß des Sandzusatzes auf die Festigkeit von Luftkalk. Versuchsreihe 4. Kalk D (aus Westfalen). Festigkeitswerte nach Tab. 29.
– – Zugfestigkeit. —— Druckfestigkeit.
A Reiner Kalk. *B* Mischung 1 : 1; *C* 1 : 2; *D* 1 : 3; *E* 1 : 5; *F* 1 : 7.

sehr großen Umfang der Versuche weitere Mischungsverhältnisse nicht in den Bereich der Untersuchung gezogen.

4. Mit Zunahme des Sandzusatzes über 1:1 hinaus nimmt die Festigkeit der Mischungen gesetzmäßig ab, jedoch von einem bestimmten Mischungsverhältnis (1 : 3) nicht in dem Maße, wie man es nach der Höhe des Sandzusatzes erwarten sollte.

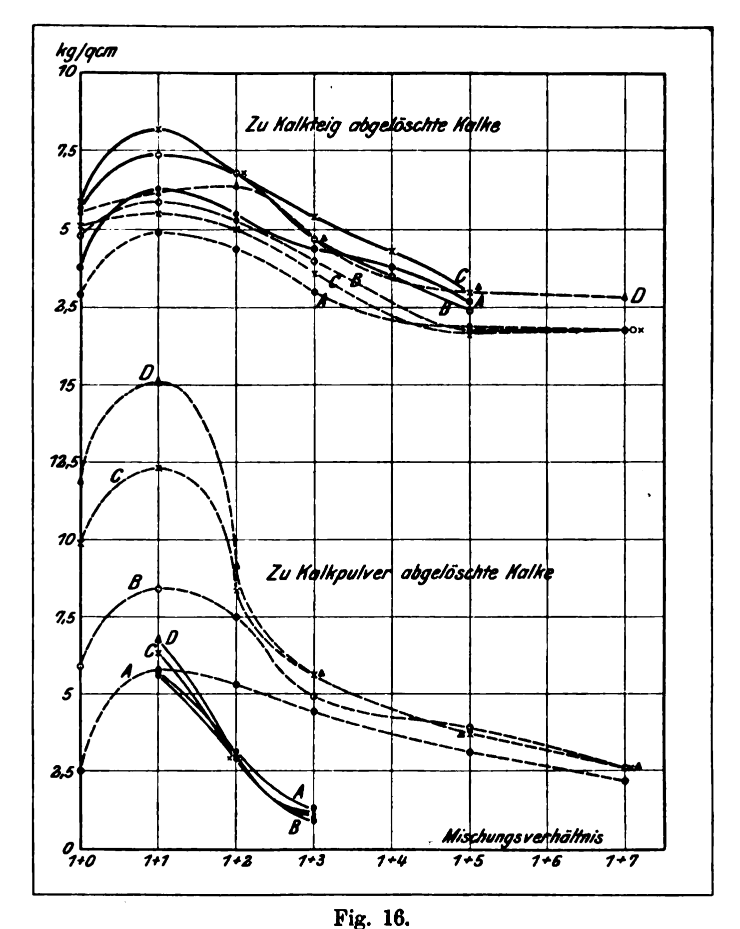


Fig. 16.

Einfluß der Höhe des Sandzusatzes auf die Erhärtung (Festigkeit) von Luftkalk.
Zugfestigkeitswerte nach Tab. 29.

— Kalk A aus Hannover } zu Pulver abgelöscht.
---- „ B „ Westfalen } zu Pulver abgelöscht.
— Kalk C aus Westfalen } zu Teig abgelöscht.
---- „ D „ „ } zu Teig abgelöscht.

A = 28 Tage alte Proben
B = 3 Monate „ „
C = 6 „ „ „
D = 1 Jahr „ „

Letzteres Ergebnis wird jedoch erklärlich, wenn man die Mischungsverhältnisse in der zeichnerischen Darstellung Fig. 20 miteinander vergleicht. Man ersieht aus dem Verlauf der Schaulinien, daß von dem Verhältnis 1:2 ab der Anteil an Sand im Mörtel mit steigendem Mischungsverhältnis, d. h. mit zunehmender Magerkeit der Mischung nur verhältnismäßig wenig abnimmt oder, wie in den

Fig. 18 und 19 gezeigt, die Abnahme des Bindemittels im Raum sehr klein wird. Der größte Unterschied in den beiden Mörtelstoffanteilen besteht zwischen dem Mischungsverhältnis 1:1 und 1:2.

Zu ähnlichen Schlußfolgerungen kommt übrigens auch Hauenschild aus Versuchen von Böhme und Dyckerhoff mit Zementmörtel, indem er feststellte, daß mit steigendem Sandzusatz das Abfallen der Festigkeit ersichtlich geringer wird, als man es nach dem steigenden Verhältnis vermuten sollte[1]). Im gleichen

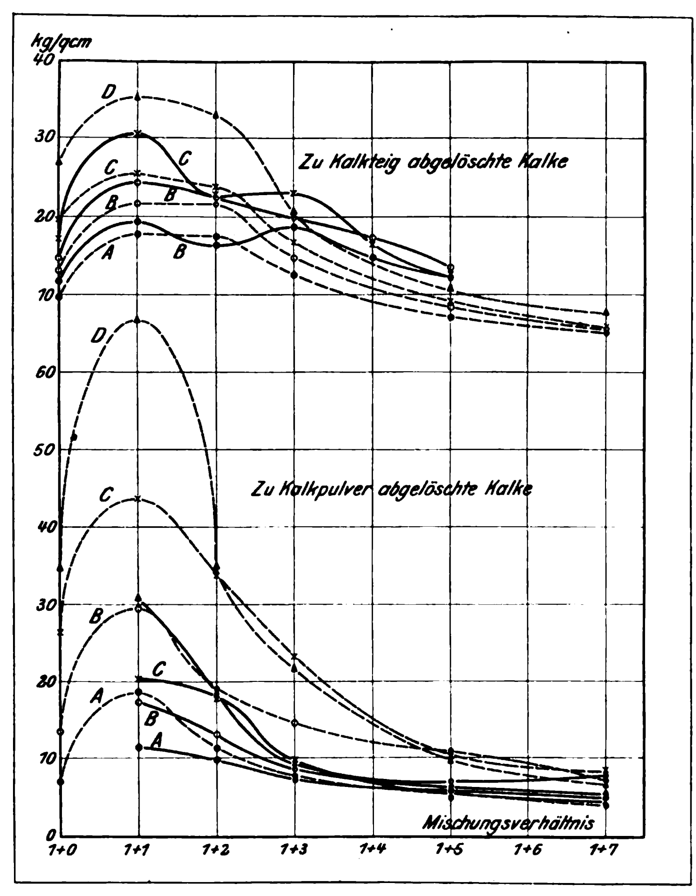


Fig. 17.
Druckfestigkeitswerte nach Tab. 29. Zeichendeutung wie zu Fig. 16.

Sinne äußert sich auch Martens in seinen „Betrachtungen über Zementmörtel und Beton" (Mitt. Materialpr.-Amt 1897, S. 85 u. ff.).

Bei Kalken liegt, wie die vorliegenden Ergebnisse beweisen, das günstigste Verhältnis bei 1:1, wenn auch nicht, wie bereits oben bemerkt, ausgeschlossen, vielmehr nach dem Verlauf der Schaulinien wahrscheinlich ist, daß zwischen 1:0 und 1:1 ein noch günstigeres Verhältnis liegt. Die Raumgewichte sind in dieser Beziehung nicht beweiskräftig; denn der höchste Dichtigkeitsgrad wird, wie aus den Werten der Raumgewichtsbestimmung (Tab. 28) ersichtlich, nicht von den Körpern

[1]) Sandfestigkeit der Zemente. Mitt. Materialpr.-Amt 1904. Heft 1/2. S. 81.

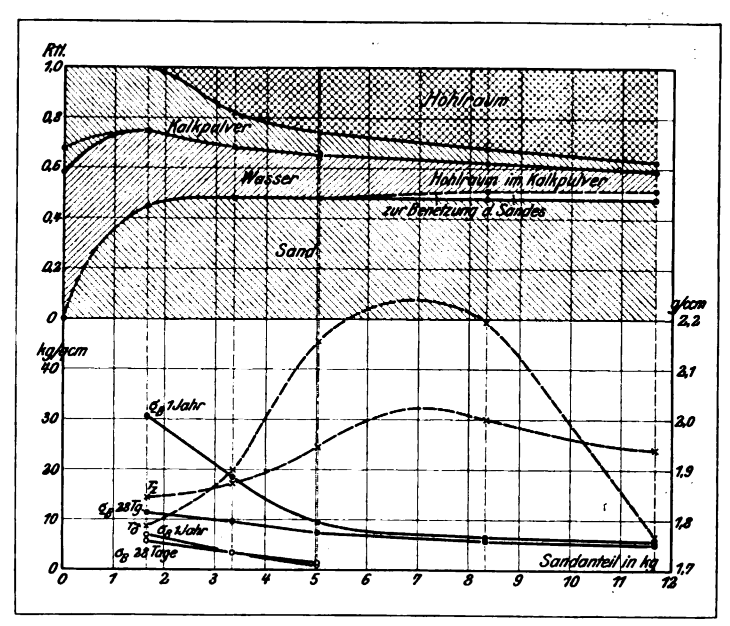


Fig. 18.

Darstellung des Mörtelzustandes in verschiedenen Mischungen und der Abhängigkeit von Dichtigkeit und Festigkeit der Probekörper. Versuchsreihe 1. Werte nach Tab. 28, 29 u. 30.
——— Festigkeit. ---- Raumgewicht.

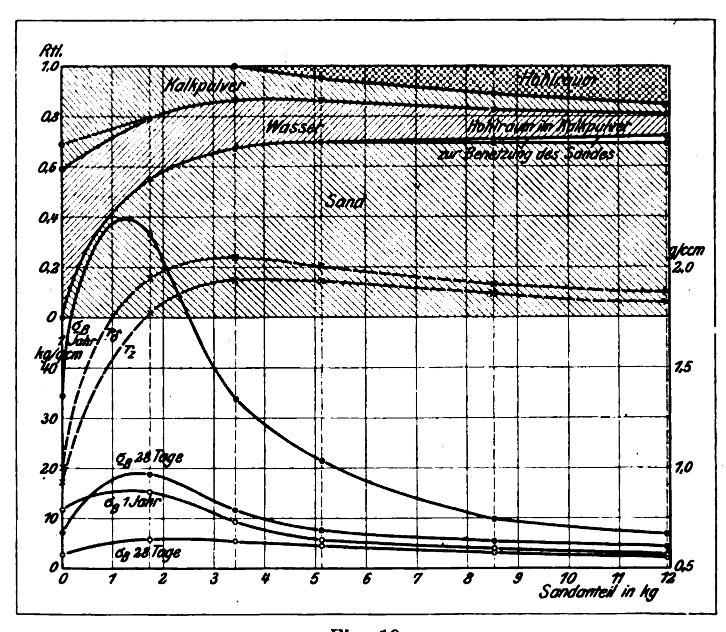


Fig. 19.

Darstellung des Mörtelzustandes in verschiedenen Mischungen und der Abhängigkeit von Dichtigkeit und Festigkeit der Probekörper. Versuchsreihe 2. Werte nach Tab. 28, 29 u. 30.
——— Festigkeit. ---- Raumgewicht.

der Mischung 1:1, die die höchsten Festigkeiten liefert, sondern von denen der Mischung 1:2 erreicht. Bindende Schlüsse lassen sich aus dem Vergleich der Raumgewichtsverhältnisse um so weniger ziehen, als hierbei noch das spezifische Gewicht der Mörtelbestandteile in Betracht kommt. Z. B. ist bei einzelnen Reihen das Raumgewicht selbst auch magerer Mischungen als 1:2 noch höher, als das der Mischung 1:1, während die Festigkeit erheblich niedriger ist, als bei der fetteren Mischung. Erst der Vergleich der auf die Raumeinheit berechneten Anteile der Mörtelbestandteile mit den Festigkeiten führt, wie die Zahlen in Tab. 30 und die Schaulinien in Fig. 18 und 19 beweisen, zu richtigen Schlüssen in dieser Richtung.

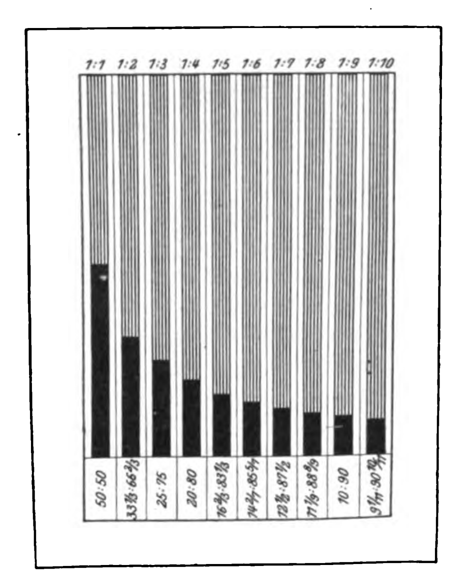


Fig. 20.
Darstellung der Mischungsverhältnisse 1:0 bis 1:10.
Bindemittel. Zuschlagstoff.

5. Die Erhärtungsfähigkeit der verschiedenen Mischungen, d. h. deren Erhärtungsfortschritt mit zunehmendem Alter ist bei den einzelnen Kalken verschieden. Normalen Erhärtungsverlauf, d. h. stetig fortschreitende Festigkeitszunahme zeigen im wesentlichen nur die Körper aus reinem Kalk und aus Mörtel 1:1. Die mageren und insbesondere die sehr mageren Mischungen zeigen keinen regelmäßigen Erhärtungsverlauf und in dieser Beziehung die Zugfestigkeitsproben wieder noch weniger als die Druckfestigkeitsproben.

Tab. 29. Ergebnisse der Festigkeitsversuche.

Mittelwerte aus je fünf Einzelversuchen.

Form des Kalkes	Wasserzusatz (-gehalt) %	Mischungs-Verhältnis (Raumteile)	Zugfestigkeit in kg/qcm nach				Druckfestigkeit in kg/qcm nach				Verhältnis Zug : Druck für			
			28 Tagen	3 Monaten	6 Monaten	1 Jahr	28 Tagen	3 Monaten	6 Monaten	1 Jahr	28 Tage	3 Monate	6 Monate	1 Jahr
Kalk A aus Hannover.														
Kalkpulver	—	1 + 0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	1 + 1	5,7	5,6	6,3	6,7	11,3	17,4	20,3	30,8	1 : 2,0	1 : 3,1	1 : 3,2	1 : 4,6
	—	1 + 2	3,1	2,9	2,9	3,0	9,9	13,0	18,1	18,8	1 : 3,2	1 : 4,5	1 : 6,2	1 : 6,3
	—	1 + 3	1,3	0,9	1,2	1,1	7,1	8,6	9,7	9,5	1 : 5,5	1 : 9,6	1 : 9,1	1 : 8,6
	—	1 + 5	Die Körper zerfielen				5,9	6,9	5,8	6,1	—	—	—	—
	—	1 + 7					5,0	7,9	4,6	5,3	—	—	—	—

Tabelle 29. (Fortsetzung.)

Form des Kalkes	Wasserzusatz (-gehalt) %	Mischungs-Verhältnis (Raumteile)	Zugfestigkeit in kg/qcm nach				Druckfestigkeit in kg/qcm nach				Verhältnis Zug : Druck für			
			28 Tagen	3 Monaten	6 Monaten	1 Jahr	28 Tagen	3 Monaten	6 Monaten	1 Jahr	28 Tage	3 Monate	3 Monate	1 Jahr
Kalk B aus Westfalen.														
Kalkpulver	47,0	1 + 0	2,5	5,9	9,9	11,9	7,0	13,4	26,4	34.3	1 : 2,8	1 : 2,3	1 : 2,7	1 : 2,9
	12,0	1 + 1	5,8	8,4	12,3	15,1	18,7	29,5	43,8	66,8	1 : 3,2	1 : 3,5	1 : 3,6	1 : 4,4
	10,0	1 + 2	5,3	7,5	8,3	9,1	11,2	19,0	33,8	34,8	1 : 2,1	1 : 2,5	1 : 4,1	1 : 3,8
	8,0	1 + 3	4,4	4,9	5,6	5,6	7,7	14,6	23,1	21,6	1 : 1,8	1 : 3,0	1 : 4,1	1 : 3,9
	7,0	1 + 5	3,1	3,9	3,7	3,7	5,3	10,9	10,6	9,9	1 : 1,7	1 : 2,8	1 : 2,9	1 : 2,7
	6,0	1 + 7	2,2	2,6	2,6	2,6	4,1	7,5	8,2	6,8	1 : 1,9	1 : 2,9	1 : 3,2	1 : 2,6
Kalk C aus Westfalen.														
Kalkteig	38,5	1 + 0	3,8	5,7	5,9	—	11,7	14,7	17,2	—	1 : 3,1	1 : 2,6	1 : 2,9	—
	12,2	1 + 1	6,3	7,4	8,2	—	19,3	24,3	30,4	—	1 : 3,1	1 : 3,3	1 : 3,7	—
	9,2	1 + 2	5,5	6,8	6,8	—	16,3	22,2	22,3	—	1 : 3,0	1 : 3,3	1 : 3,3	—
	8,0	1 + 3	4,4	4,7	5,4	—	18,7	19,9	23,0	—	1 : 4,3	1 : 4,2	1 : 4,3	—
	5,8	1 + 4	3,8	3,5	4,3	—	14,7	17,1	16,5	—	1 : 3,9	1 : 4,9	1 : 3,8	—
	4,5	1 + 5	2,7	2,4	3,0	—	12,2	13,4	12,5	—	1 : 4,5	1 : 5,6	1 : 4,2	—
Kalk D aus Westfalen.														
Kalkteig	45,0	1 + 0	2,9	4,8	5,1	5,6	9,8	13,0	19,8	26,8	1 : 3,4	1 : 2,7	1 : 3,9	1 : 4,8
	11,1	1 + 1	4,9	5,9	5,5	6,2	17,7	21,6	25,3	35,1	1 : 3,6	1 : 3,7	1 : 4,6	1 : 5,7
	7,4	1 + 2	4,4	5,3	5,0	6,4	17,3	21,6	23,8	32,9	1 : 3,9	1 : 4,1	1 : 4,8	1 : 6,2
	6,7	1 + 3	3,0	4,0	3,6	4,7	12,6	14,8	16,8	20,2	1 : 4,2	1 : 3,7	1 : 4,7	1 : 4,3
	4,8	1 + 5	1,9	1,8	1,7	3,0	7,1	8,3	9,1	10,6	1 : 3,7	1 : 4,6	1 : 5,4	1 : 3,5
	4,7	1 + 7	1,8	1,8	1,8	2,8	5,1	5,5	5,7	7,7	1 : 2,8	1 : 3,1	1 : 3,2	1 : 2,8

Einzelne Mörtel gehen sogar, wie aus den Festigkeitswerten und namentlich dem Verlauf der sie darstellenden Schaulinien (Fig. 12—16) ersichtlich ist, bei gewissem Alter in der Festigkeit zurück. Da diese Erscheinung sich nicht nur bei einem, sondern bei mehreren Kalken wiederholt, so ist vielleicht der Schluß nicht unberechtigt, daß dieser Rückgang der Festigkeit, der doch auf einem zunehmenden Mangel an mechanischem Zusammenhang des Mörtels beruhen muß, auf Kohlensäureaufnahme aus der Luft und dadurch bewirkte Umwandlung des Kalkhydrats in kohlensauren Kalk zurückzuführen ist; eine Umwandlung, die bei den mageren und porösen Mörteln schneller und intensiver vor sich geht, als bei den fetteren und daher dichteren [1]).

Der etwaige Einfluß der Kohlensäureeinwirkung auf die Raumänderung der Mörtel ließe sich vielleicht durch Längenmessungsversuche, wie sie vielfach mit Zementmörtel vorgenommen werden, feststellen.

---

1) Die Lockerung des Zusammenhanges infolge Kohlensäureaufnahme läßt sich damit erklären, daß der sich bildende kohlensaure Kalk einen geringeren Raum einnimmt, als ursprünglich das Kalkhydrat (bekanntlich hat kohlensaurer Kalk ein höheres spezifisches Gewicht als Kalkhydrat) und sich infolgedessen die in den mageren Mörteln, namentlich bei mauergerechtem Anmachen, befindlichen an sich schon verhältnismäßig großen Hohlräume noch mehr vergrößern, wodurch die Festigkeit des ganzen sich verringert.

Tab. 30. Berechnung der Porenraumfüllung von Kalkmörteln in verschiedenen Mischungsverhältnissen.

Versuchsreihe 1: Sand A. $R_r = 1,795$; $b_r = 0,480$; $u_r = 0,520$; 1 kg = 0,557 l_r. **Kalkpulver A:** $R_r = 0,708$; $b_r = 0,322$ [1]; $u_r = 0,678$ [1]; 1 kg = 1,412 l_r mit 0,957 l Hohlraum und 0,455 l dichter Masse [2].

Versuchsreihe 2: Sand B. $R_r = 1,846$; $b_r = 0,698$; $u_r = 0,302$; 1 kg = 0,542 l_r. **Kalkpulver B:** $R_r = 0,687$; $b_r = 0,312$ [1]; $u_r = 0,688$ [1]; 1 kg = 1,456 l_r mit 1,002 l Hohlraum und 0,454 l dichter Masse [3].

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Mischung: Kalkpulver Reihe 1: 0,563 kg, „ 2: 0,550 „ auf			In Raumteilen: Sand						Berechnung des Mörtelrückstandes im Probekörper: Raumgewicht (28 Tage beobachtet)		Im Mörtelkörper ist vorhanden: an dichter Masse				an Hohlraum		In d. Raumeinheit ist vorhanden: an dichter Masse			an Hohlraum		Vom Wasser dient zur	
Raumteile	n kg Sand	mit 10% Wasser auf 1+n kg Masse %	$\frac{1}{R_r} \times n = \left\{\begin{matrix}0,557\\0,542\end{matrix}\right\} \times n$ l	Hohlraum Sp. 4 × u_r ($u_r = \left\{\begin{matrix}0,520\\0,302\end{matrix}\right.$) l	Sandhohlraum − Kalkpulver Sp. 5 − $\left\{\begin{matrix}0,256\\0,250\end{matrix}\right.$ l	Wasserzusatz $w^1 = w \times \frac{1+n}{100}$ l	Sp 7 − Hohlraum im Kalkpulver Sp. 7 − $\left\{\begin{matrix}0,539\\0,551\end{matrix}\right.$ l	Zur Benetzung von 1 l Sand Sp 8/n l	Zugprobe r_z	Druckprobe r_b	Sand Sp.4× $\left\{\begin{matrix}0,480\\0,698\end{matrix}\right.$ l	Kalkpulver l	Wasser l	in Summa l	im Kalkpulver l	im Mörtel Sp. 4 − Sp. 15 l	Sand Rtl.	Kalkpulver Rtl.	Wasser Rtl.	im Mörtel Rtl.	im Kalkpulver Rtl	Füllung des Hohlraumes i Kalkpulver Rtl.	Benetzung des Sandes Rtl.
Kalkpulver A [4]. Reihe 1.																							
1 : 0	0	(43,0)	(0,795)	(0,539)	—	(0,470)	(—0,069)	—	—	—	—	0,256	0,470	0,726	0,539	(0,069)	—	0,322	0,591	(0,087)	0,664	0,591	—
1 : 1	1,668	13,0	0,929	0,483	0,227	0,290	— 0,249	—	1,843	1,789	0,446	0,256	0,290	0,992	0,539	—	0,450	0,258	0,292	—	0,543	0,292	—
1 : 2	3,336	9,5	1,858	0,966	0,720	0,370	— 0,169	—	1,871	2,000	0,892	0,256	0,370	1,518	0,539	0,340	0,480	0,138	0,199	0,183	0,290	0,199	—
1 : 3	5,004	8,5	2,787	1,449	1,193	0,473	— 0,066	—	1,943	2,155	1,338	0,256	0,473	2,067	0,539	0,720	0,480	0,092	0,170	0,258	0,193	0,170	—
1 : 5	8,340	7,5	4,645	2,415	2,159	0,668	0,129	0,015	2,000	2,186	2,230	0,256	0,668	3,154	0,539	1,491	0,480	0,055	0,144	0,321	0,116	0,116	0,028
1 : 7	11,676	6,0	6,503	3,381	3,125	0,734	0,195	0,070	1,914	1,769	3,122	0,256	0,734	4,112	0,539	2,391	0,480	0,039	0,113	0,368	0,083	0,083	0,030
Kalkpulver B [4]. Reihe 2.																							
1 : 0	0	(47,0)	(0,801)	(0,551)	—	(0,470)	(—0,081)	—	1,000	0,930	—	0,250	0,470	0,720	0,551	(0,081)	—	0,512	0,587	(0,101)	0,688	0,587	—
1 : 1	1,704	12,0	0,923	0,279	0,029	0,270	— 0,281	—	1,943	1,780	0,644	0,250	0,270	1,164	0,551	—	0,553	0,215	0,232	—	0,473	0,232	—
1 : 2	3,408	10,0	1,846	0,557	0,307	0,396	— 0,155	—	2,043	1,938	1,288	0,250	0,396	1,934	0,551	—	0,666	0,129	0,205	—	0,285	0,205	—
1 : 3	5,112	8,0	2,769	0,836	0,586	0,453	— 0,098	—	2,000	1,930	1,932	0,250	0,453	2,635	0,551	0,134	0,698	0,090	0,164	0,048	0,199	0,164	—
1 : 5	8,520	7,0	4,615	1,394	1,144	0,635	0,084	0,001	1,914	1,865	3,220	0,250	0,635	4,105	0,551	0,510	0,698	0,054	0,138	0,110	0,120	0,120	0,018
1 : 7	11,928	6,0	6,461	1,951	1,701	0,748	0,197	0,017	1,871	1,834	4,508	0,250	0,748	5,506	0,551	0,955	0,698	0,039	0,116	0,147	0,085	0,085	0,031

[1]) Das spezifische Gewicht des Kalkhydratpulvers ist zu 2,2 angenommen; **diese Zahl kann als zuverlässiger Durchschnittswert für das spezifische** Gewicht lufttrockenen Kalkhydrats angesehen werden.

[2]) Zur Herstellung der Mischungen ist als Einheitsgewicht für Kalkpulver **0,563 kg/l, d. i. das arithmetische Mittel aus R_f und R_r, angewandt** worden. 0,563 kg = 0,795 l_r mit 0,256 l dichter Masse und 0,539 l Hohlraum.

[3]) Zur Herstellung der Mischungen ist als Einheitsgewicht für Kalkpulver **0,550 kg/l, d. i. das arithmetische Mittel aus R_f und R_r, angewandt** worden. 0,550 kg = 0,801 l_r mit 0,250 l dichter Masse und 0,551 l Hohlraum.

[4]) Die eingeklammerten Zahlen beziehen sich auf das reine Kalkpulver.

Um zu ermitteln, ob und inwieweit die Untersuchung Ziurecks und der daraus von dem Forscher gezogene Schluß, daß in gutem Luftkalkmörtel der Gehalt an Kalkhydrat 13—15 % (bezogen auf den trockenen Mörtel) betragen solle, mit dem vorliegenden Prüfungsbefund im Einklange steht, sind die Kalkgehalte der verschiedenen Mörtelmischungen zweier Kalke (Kalk B und D aus Westfalen) in Tab. 31, in Prozenten des Gewichts der trockenen Mischung aus Ätzkalk und Sand berechnet, zusammengestellt.

Tab. 31. **Gehalt an Kalkhydrat — $Ca(OH)_2$ — in Kalkmörteln verschiedener Zusammensetzung.**

Probematerial (Versuchsreihe)	Kalk B aus Westfalen (zu Kalkpulver abgelöscht), Berliner Mauersand (Reihe 2)		Kalk D aus Westfalen (zu Kalkteig abgelöscht), Mauersand (Quarzsand) (Reihe 4)	
Mischungsverhältnis Kalk : Sand	Gehalt an Kalk und Sand in Gewichtsteilen	Gehalt an Kalkhydrat %[1]	Gehalt an Kalk und Sand in Gewichtsteilen	Gehalt an Kalkhydrat %[1]
1 : 1	0,525 kg $Ca(OH)_2$ 1,704 kg Sand	23,6	0,542 kg $Ca(OH)_2$ 1,665 kg Sand	24,6
1 : 2	0,525 kg $Ca(OH)_2$ 3,408 kg Sand	13,3	0,542 kg $Ca(OH)_2$ 3,330 kg Sand	14,0
1 : 3	0,525 kg $Ca(OH)_2$ 5,112 kg Sand	9,3	0,542 kg $Ca(OH)_2$ 4,995 kg Sand	9,8
1 : 5	0,525 kg $Ca(OH)_2$ 8,520 kg Sand	5,8	0,542 kg $Ca(OH)_2$ 8,325 kg Sand	6,1
1 : 7	0,525 kg $Ca(OH)_2$ 11,928 kg Sand	4,2	0,542 kg $Ca(OH)_2$ 11,655 kg Sand	4,4

[1]) Gewichtsprozente, bezogen auf das trockene Gemisch aus Kalk und Sand.

Der Vergleich dieser Zahlen mit den gefundenen Festigkeitswerten der Mörtel aus diesen Kalken bestätigt im wesentlichen den Befund der Ziureck schen Beobachtungen und beweist die Berechtigung der darauf gegründeten Forderung,

> daß der Kalkhydratgehalt brauchbarer Kalkmörtel mindestens 13 % (= etwa 10 % Ätzkalk) betragen muß; dies entspricht nach Vorstehendem einem Mischungsverhältnis von Kalkteig zu Sand in den Grenzen 1 : 1½ bis 1 : 2. (In der Raumeinheit müssen je nach der Dichtigkeit des Sandes mindestens 0,130—0,150 Raumteile dieser Masse oder etwa 0,400—0,500 Raumteile Kalkhydratpulver sein; wird das Raumgewicht des Kalkpulvers im eingerüttelten Zustande zu rund 0,700 [1 cbm also = 700 kg] angenommen, so müssen in der Raumeinheit Mörtel 0,280—0,350 Gewichtsteile Kalkpulver enthalten sein.)

Wenn auch bei den Versuchen mit dem fetteren Mörtel 1 : 1 höhere Festigkeiten erzielt wurden, so darf man aus dieser Tatsache doch nicht den Schluß ziehen, daß gerade übermäßig fette Kalkmörtel für die praktische Verwendung die zweckmäßigsten seien; denn die Benutzung dieser Mörtel ist, wie oben bereits ausgeführt wurde, vom ökonomischen Standpunkte aus nicht nur nicht vorteilhaft, sondern wegen ihres zu starken Schwindens und des hierdurch bewirkten zu starken Setzens des aus ihnen hergestellten Mauerwerks sogar nur wenig empfehlenswert.

Im vorliegenden Falle konnte dieser Einfluß des Schwindens bei den fetten Mörteln nicht zur Wirkung und daher in den Festigkeitszahlen nicht zum Ausdruck gelangen, weil die geprüften Mörtel mit nur wenig Wasser angemacht und infolge dieses Umstandes und ferner des mechanischen Einschlagens bei der Anfertigung bezw. der hierdurch bewirkten engster Aneinanderlegung der Mörtelteilchen so stark verdichtet waren, daß die fernere Feuchtigkeitsabgabe der Mörtel bei der Lagerung an der Luft kein oder wenigstens kein nennenswertes weiteres Schwinden derselben (auch nicht der fetten) mehr herbeizuführen vermochte.

f) Einfluß des Grades der Verdichtung (Dichtigkeitsverhältnisse) auf die Festigkeit der Kalkmörtel aus Luftkalk.

Sind Mörtelbestandteile (Bindemittel, Zuschlagstoffe, Anmachewasser) und ein bestimmtes Mischungsverhältnis der Bestandteile gegeben, so hängt der Dichtigkeitsgrad des daraus bereiteten Mörtels und dessen spätere Festigkeit ab von:

1. der Art der Bereitung (Menge des Anmachewassers),
2. der Art und Energie des Mischens (Gleichmäßigkeit der Mischung),
3. der Beschaffenheit der Mauersteinmaterialien (Grad der Porosität bezw. Wasseraufnahmefähigkeit),
4. dem Druck der Steinschichten (Verdichtung infolge mechanischer Einflüsse);

denn alle diese Umstände bedingen mehr oder weniger den Grad der Verdichtung des Mörtels.

Diese Tatsache ist, soweit Portland-Zement in Betracht kommt, sowohl aus Erfahrungen der Praxis [1]) bekannt, als auch durch die Ergebnisse zahlreicher Versuche [2]) bestätigt worden.

Eine gewisse Dichte ist für Kalkmörtel deshalb von Bedeutung, weil bei diesen unter gewöhnlichen Verhältnissen keine chemische Wechselwirkung zwischen Bindestoff (Kalk) und Zuschlagstoff (Sand) stattfindet, die Verbindung dieser Mörtel vielmehr, wenigstens deren Anfangserhärtung im wesentlichen auf die Verdichtung durch mechanische Einflüsse angewiesen ist.

Auf die wichtige Rolle, die der Dichtigkeitsgrad des Mörtels auch bei Kalkmörtel spielt, macht bereits Manger [3]) in seinem Hilfsbuch zur Anfertigung von Bauanschlägen aufmerksam und weist darauf hin,

„daß außer dem Alter des Mörtels und der Kalkmasse darin besonders die Dichtigkeit, mit der die Sandkörner auf- und nebeneinander liegen, sowie an der Oberfläche der davon berührten Steine lagern, es sei, die die Festigkeit des Mörtels bedinge; denn mit der Dichtigkeit verringerten sich die Zwischenräume".

Genannter Forscher führte auch Versuche nach dieser Richtung aus, indem er Probekörper aus Kalkmörtel mittels eines Prägewerkes herstellte. Aus dem gewonnenen Ergebnis schloß er,

„daß für Ziegelwerk über der Erde das mittlere Verhältnis des Kalkmörtels 1 : 3, das höchste 1 : ½ und das niedrigste 1 : 4½ sein könne; mittleres Verhältnis gibt ein gutes und dauerndes Mauerwerk, das an Kalkzusatz höhere ein noch festeres, aber sehr langsam erstarrendes, das an Kalkzusatz geringere ein mittelfestes, aber in kurzer Zeit erstarrendes Mauerwerk."

---

[1]) Der Portlandzement und seine Anwendung im Bauwesen. 1905. Verlag der „Deutschen Bauzeitung", Berlin.

[2]) Über die Ursachen der Abweichungen in den Festigkeitsergebnissen der Zementprüfung an verschiedenen Orten. Mitt. Materialpr.-Amt 1898. Heft 1. S. 1.

[3]) Gottgetreu, Physische und chemische Beschaffenheit der Baumaterialien. 1881. 2. Bd. S. 268. Verlag Julius Springer, Berlin.



Weitere Versuche über den Einfluß der Dichte als die von Manger vorgenommenen, liegen, soweit Fettkalkmörtel in Frage kommt, meines Wissens nicht vor, namentlich keine besonderen Versuche über den Grad der Beeinflussung der Dichte durch die oben unter 1 bis 4 genannten Umständen.

Art der Bereitung. In der Praxis wird Kalkmörtel mit so viel Wasser angemacht, daß er sogenannte mauer- (mörtel- oder kellen-) gerechte Steife erlangt; der Mörtel läuft in diesem Zustande glatt von der Kelle. Die Wassermenge muß auch möglichst dem zur Verwendung gelangten Steinmaterial angepaßt sein, da je nach der Wasseraufnahmefähigkeit der Steine mehr oder weniger Wasser aus dem Mörtel aufgesaugt wird und eine zu schnelle Absaugung des Wassers nicht wünschenswert ist. (In der Praxis werden daher die Mauersteine vor dem Vermauern gewässert.) Bei Verwendung sehr poröser Steine wird man den Wasserzusatz etwas erhöhen. Zu viel Wasser im Mörtel wirkt schädlich, da der wasserreiche Mörtel nach dem Vermauern und nachdem das Wasser durch Aufsaugung und Verdunsten entfernt ist, poröser wird als der weniger Wasser enthaltende. Die technische Prüfung benutzt in fast allen Ländern (nur Frankreich prüft als Norm plastischen Mörtel) für die Festigkeitsversuche erdfeucht angemachten Mörtel. Dieses für die Zementprüfung eingeführte Verfahren ist auch auf Kalke übertragen worden.

Es schien von Interesse, den Einfluß der verschiedenartigen Verarbeitungsweise (mauergerecht und erdfeucht) in etwa festzustellen. Zu diesem Zwecke wurden folgende Versuche ausgeführt.

Versuchsreihe 1.

Aus Kalk mit rund 97% Kalkgehalt (siehe Tab. 31 a) und Mauersand im Verhältnis 1 : 3 wurden Mörtel verschiedener Steife, nämlich erdfeucht, d. h. mit wenig Wasser, und kellengerecht, d. h. mit viel Wasser, bereitet und aus diesen Zug- und Druckprobekörper hergestellt; der erdfeuchte Mörtel wurde in die Formen normengemäß, d. h. mit 150 Schlägen auf dem Hammerapparat, Bauart Böhme, eingeschlagen, der mauergerechte Mörtel mit der Kelle in die Formen eingefüllt; im letzteren Falle standen die Formen auf absaugenden Unterlagen (durch Abschleifen geebnete Dachziegel), um die Wirkung des Absaugens eines Teiles des Mörtelwassers durch die Mauersteine, wie es in der Wirklichkeit stattfindet, nach Möglichkeit nachzuahmen.

Tab. 31 a. **Einfluß der Verarbeitungsweise auf Raumgewicht und Festigkeit von Kalkmörtel.**

Analyse des Kalkes.

Versuchsreihe 1.

(Bezogen auf den kohlensäure- und wasserfreien Zustand.)

Kieselsäure und Unlösliches	0,97 %
Eisenoxyd und Tonerde	0,53 „
Ätzkalk	96,92 „
Magnesia	0,93 „
Schwefelsäureanhydrid	0,66 „



Tab. 32. **Raumgewicht und Festigkeit verschieden verarbeiteten Kalkmörtels.**
Mittelwerte aus je fünf Einzelversuchen.
Mörtelmischung: 1 Raumteil Kalkteig + 3 Raumteile Mauersand.

Art der Proben-anfertigung	Zugproben				Druckproben			
	1 Tag	7 Tage	28 Tage	115 Tage	1 Tag	7 Tage	28 Tage	115 Tage
	Raumgewicht g/ccm							
Erdfeucht eingeschlagen	2,100	2,043	2,043	2,071	2,093	1,977	1,969	1,986
Mauergerecht eingefüllt	1,886	1,800	1,814	1,814	1,851	1,746	1,749	1,763
	Festigkeit kg/ccm							
Erdfeucht eingeschlagen	—	3,8	4,6	6,1	—	11,4	14,9	19,9
Mauergerecht eingefüllt	—	3,1	4,9	5,4	—	4,3	6,0	8,6
	Verhältniszahlen; Festigkeit des erdfeuchten Mörtels : 100.							
Mauergerebt eingefüllt	—	82	106	89	—	38	40	43

Die Prüfung der 7, 28 und 115 Tage alten Proben lieferte die in Tab. 32 verzeichneten Raumgewichts- und Festigkeitswerte; die letzteren sind in Fig. 21 zeichnerisch dargestellt. Aus den Ergebnissen ist der Einfluß der Verarbeitungsweise ohne weiteres ersichtlich. Raumgewicht und Festigkeit der erdfeucht eingeschlagenen Körper sind erheblich höher, als die der eingefüllten Proben; am größten ist der Unterschied bei den Druckprobekörpern. (Siehe die Verhältniszahlen in Tab. 32.) Der Unterschied in r und σ_{-B} der beiden Mörtelarten erklärt sich ohne weiteres aus der Art der Bearbeitung des Mörtels. Der erdfeuchte Mörtel wird durch Einschlagen stark verdichtet, indem Kalk- und Sandteilchen sich inniger aneinander legen (Wasser- und Luftteilchen werden zum Teil entfernt) und die Masse auf einen geringeren Raum zusammengepreßt wird, als sie vorher eingenommen hatte. Der mauergerechte Mörtel verliert zwar sein Wasser (durch Abgabe an die absaugenden Unterlagen und beim Verdunsten) und verringert ebenfalls infolge Einschrumpfens des Kalkes sein Volumen; indessen tritt kein so enges Aneinanderlegen der Mörtelteilchen und daher keine so große Verdichtung (Raumgewicht) ein, wie beim erdfeuchten Mörtel.

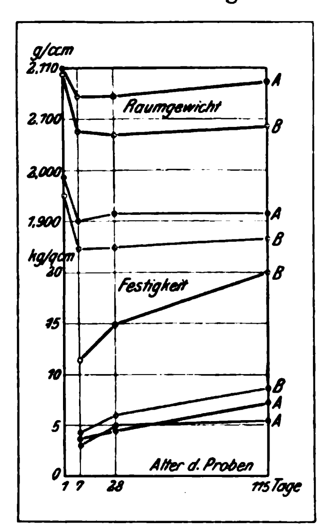


Fig. 21.
Raumgewicht und Festigkeit verschieden verarbeiteten Kalkmörtels. Werte nach Tab. 32. —— Erdfeucht eingeschlagener Mörtel. —— Mauergerecht eingefüllter Mörtel. *A* Zugproben. *B* Druckproben.

Versuchsreihe 2.

Eine weitere Versuchsreihe (2) erstreckte sich gleichzeitig auf drei Mörtelarten, und zwar auf:

1. Mörtel aus 1 Gewichtsteil Kalkteig (Harzer Kalk) + 4 Gewichtsteilen Normalsand,
2. Mörtel aus 1 Gewichtsteil Kalkteig (Schlesischer Kalk) + 3 Gewichtsteilen Mauersand,
3. fertigen Kalkmörtel aus einem Berliner Mörtelwerk.

Aus diesen Mörteln wurden Zug- und Druckprobekörper mit verschiedenem Wassergehalte [1]) hergestellt; die kellengerechten Mörtel wurden, wie oben beschrieben, in die Form eingefüllt, die erdfeuchten eingeschlagen. Die Ergebnisse der Raumgewichtsbestimmung und der Festigkeitsversuche dieser Reihe (Tab. 33) zeigen ebenso wie die Werte der ersten Reihe deutlich die Wirkung der Mörtelverarbeitung auf Raumgewicht und Festigkeit. Der Festigkeitsunterschied zwischen den erdfeucht eingeschlagenen und mauergerecht eingefüllten Proben geht übersichtlich aus dem Verlaufe der Schaulinien in Fig. 22 und aus den Verhältniszahlen in Tab. 33 hervor.

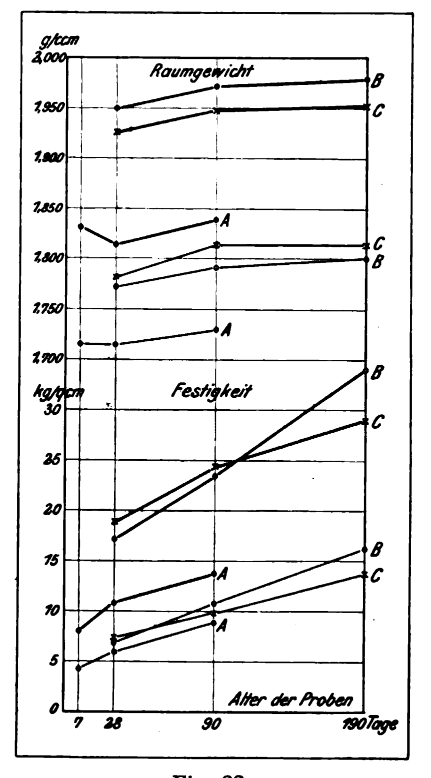


Fig. 22.
Raumgewicht und Festigkeit verschieden verarbeiteter Mörtel. Werte nach Tab. 33.
— Erdfeuchter, — mauergerechter Mörtel.
A 1 Kalkteig (harter Kalk) + 4 Normalsand.
B 1 „ (Schles. Kalk) + 3 Mauersand.
C Kalkmörtel von einem Berliner Mörtelwerk.

Tab. 33. **Raumgewicht und Druckfestigkeit verschieden verarbeiteter Kalkmörtel.**

Versuchsreihe 2.
Mittelwerte aus je fünf Einzelversuchen.

Mörtelmischung	1 Gewichtsteil Kalkteig (Harzer Kalk) + 4 Gewichtsteile Normalsand			1 Gewichtsteil Kalkteig (Schlesischer Kalk) + 3 Gewichtsteile Mauersand			Kalkmörtel, aus einem Berliner Mörtelwerk bezogen		
Art der Proben-anfertigung	7 Tage	28 Tage	90 Tage	28 Tage	90 Tage	180 Tage	28 Tage	90 Tage	180 Tage
	Raumgewicht g/ccm.								
Erdfeucht eingeschlagen	1,831	1,825	1,839	1,949	1,972	1,980	1,927	1,947	1,952
Mauergerecht eingefüllt	1,715	1,715	1,730	1,772	1,792	1,800	1,783	1,814	1,814

[1]) Der erdfeuchte Mörtel wurde in der Weise erzielt. daß der kellengerechte Mörtel auf porösen Unterlagen abgesaugt wurde (Ausbreiten des Mörtels in dünner Lage auf Gipsplatten).

Tabelle 33 (Fortsetzung).

Mörtelmischung	1 Gewichtsteil Kalkteig (Harzer Kalk) + 4 Gewichtsteile Normalsand			1 Gewichtsteil Kalkteig (Schlesischer Kalk) + 3 Gewichtsteile Mauersand			Kalkmörtel, aus einem Berliner Mörtelwerk bezogen		
Art der Probenanfertigung	7 Tage	28 Tage	90 Tage	28 Tage	90 Tage	180 Tage	28 Tage	90 Tage	180 Tage
	Druckfestigkeit kg/qcm.								
Erdfeucht eingeschlagen	8,0	10,7	13,7	17,1	23,5	34,0	18,8	24,3	28,9
Mauergerecht eingefüllt	4,2	5,9	8,9	6,8	10,7	16,1	7,1	9,8	13,8
	Verhältniszahlen; Festigkeit des erdfeuchten Mörtels = 100.								
Mauergerecht eingefüllt	53	55	65	40	46	48	38	41	48

Hiernach erreicht die Festigkeit des kellengerechten Mörtels kaum die Hälfte des erdfeuchten Mörtels.

Die Ergebnisse beweisen, daß erdfeuchter eingeschlagener Mörtel mehr verdichtet wird und höhere Festigkeiten liefert, als mauergerecht eingefüllter.

Art des Mischens. Die Höhe des Wasserzusatzes bedingt in gewissem Sinne die Art des Mischens. Wasserarmer Mörtel muß zur Erzielung der erforderlichen gleichmäßigen Beschaffenheit und zur Vermeidung der Anhäufung von Kalk an der einen oder von Sand an der anderen Stelle besser durchgemischt werden und eine bessere Durcharbeitung und Durchknetung erfahren, als wasserreicher Mörtel. Ungenügendes Mischen verhindert die Gleichmäßigkeit der Masse und die innige Verkittung der einzelnen Teilchen und verringert somit die Festigkeit des Mörtels. Gehöriges Mischen und namentlich Kneten des Mörtels erhöht die Dichte der Masse, indem die Bindemittelchen zum engeren Anliegen an die Sandkörner gebracht werden, und hat höhere Festigkeit zur Folge. Früher wurde der Mörtel lediglich von Hand gemischt; seitdem man jedoch geeignete Mischmaschinen ersonnen und gebaut hat, wird an Stellen, an denen große Mörtelmassen verarbeitet werden, der Mörtel meist maschinell gemischt, bezw. maschinell gemischter verwendet. Daß letztere Art des Mischens die zweckmäßigere und stets die am meisten vorzuziehende sein wird, ist ohne weiteres einleuchtend; denn die Vermischung der zähen Kalkteigmasse mit dem Sande ist nicht nur mühsam und zeitraubend, sondern auch von Hand nur unvollkommen möglich, wenn nicht, wie oben bereits angedeutet, verhältnismäßig hoher Wasserzusatz angewendet wird. Hierbei spielt die Energie des Mischens und daher auch die Wirkungsweise der Mischmaschinen eine bedeutsame Rolle.

Zur Feststellung des Einflusses der Art des Mischens auf die Mörtelfestigkeit von Luftkalk wurden folgende Versuche ausgeführt:

Reihe 1.

Aus Kalkteig (gewonnen aus Kalk mit 97,20 % Ätzkalkgehalt) und Berliner Mauersand wurde Mörtel bereitet, und zwar wurde ein Teil des Mörtels von Hand und ein Teil im Mörtelmischer (Bauart: Steinbrück-Schmelzer) gemischt.

Das Handmischen erfolgte mittelst eines Spatels so lange, bis die Mörtelmasse völlig gleichmäßiges Aussehen erhielt, das Maschinenmischen im Mörtelmischer unter Anwendung von 20 Umdrehungen der Mischschüssel. Aus den beiden Mörtelarten wurden Zug- und Druckproben normenmäßig hergestellt. Eigenschaften der verwendeten Mörtelstoffe siehe Tab. 34 und 35. Die Ergebnisse der Raumgewichts- und Festigkeitsprüfungen sind in Tab. 36 enthalten.

Hiernach haben die maschinell gemischten Proben durchschnittlich höheres Raumgewicht als die handgemischten, während der Unterschied in den Festigkeiten, wenigstens in der Zugfestigkeit, nicht nennenswert ist. Bei sechs Monaten Alter ist nur der Unterschied in der Druckfestigkeit beider Mörtelarten etwas größer (5 kg).

Einfluß der Art des Mischens auf die Festigkeit von Kalkmörtel.

Tab. 34. **Analyse des Kalkes.**

(Bezogen auf den kohlensäure- und wasserfreien Zustand.)

Kieselsäure	1,49 %
Eisenoxyd und Zement	1,00 „
Ätzkalk	97,20 „
Magnesia	0,38 „
Schwefelsäureanhydrid	0,03 „
Alkalien	Spuren

Tab. 35. **Eigenschaften des Sandes (Berliner Mauersand).**

$R_f = 1{,}561$ kg
$R_r = 1{,}850$ „
$s = 2{,}649$
$\mathfrak{d} = 0{,}698$
$\mathfrak{u} = 0{,}302$

Gehalt an abschlämmbaren Bestandteilen 0,82 %.

Tab. 36. **Raumgewicht und Festigkeit.**

Mittelwerte aus je fünf Einzelversuchen.

Mörtelmischung: 1 Gewichtsteil Kalkteig + 3 Gewichtsteile Mauersand.

Art des Mischens	Zugproben				Druckproben			
	3 Tage	28 Tage	3 Monate	6 Monate	3 Tage	28 Tage	3 Monate	6 Monate
Raumgewicht g/ccm.								
Handmischen	2,114	nicht festgestellt	2,057	2,057	2,082	nicht festgestellt	1,935	1,949
Maschinenmischen	2,129	nicht festgestellt	2,100	2,100	2,138	nicht festgestellt	2,017	2,031
Festigkeit kg/qcm.								
Handmischen	—	7,0	6,2	7,5	—	13,6	20,1	21,1
Maschinenmischen	—	6,0	8,2	7,2	—	13,6	24,2	26,1

Reihe 2.

In höherem Maße als bei dem Mörtel der Reihe 1 kam der Einfluß der verschiedenen Mischart bei Proben der Reihe 2 zum Ausdruck. Diesen Versuchen lagen drei Mörtel verschiedener Zusammensetzung (1 : 3, 1 : 5 und 1 : 7) zugrunde, indem angenommen wurde, daß der Einfluß des Mischens bei mageren Mischungen mehr in die Erscheinung treten würde, als bei fetten. Ferner wurde hierbei der

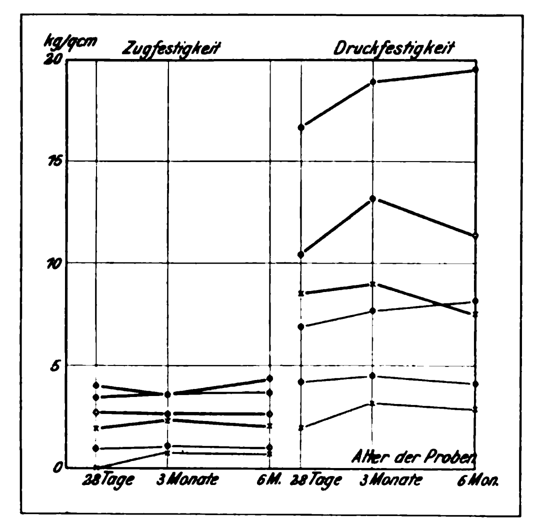


Fig. 23.
Festigkeit der Mörtel nach Tabelle 39.
——— Handmischen. ━━━ Maschinenmischen.
• Mischung 1 : 3. ○ Mischung 1 : 5. × Mischung 1 : 7.

von Hand gemischte Mörtel nur oberflächlich mit der Kelle durchgearbeitet, wie es häufig in der Praxis geschieht, während der maschinell gemischte, ebenfalls wie bei Reihe 1 im Mörtelmischer unter Anwendung von 20 Schüsselumdrehungen gemischt wurde.

Die mittleren Ergebnisse der Versuche dieser Reihe sind in den Tab. 37 und 39 verzeichnet, die Festigkeitswerte außerdem in Fig. 23 veranschaulicht.

Tab. 37. **Analyse des Kalkes.**

(Bezogen auf den kohlensäure- und wasserfreien Zustand.)

Kieselsäure und Unlösliches	0,97 %
Eisenoxyd und Tonerde	0,53 „
Ätzkalk	96,92 „
Magnesia	0,93 „
Schwefelsäureanhydrid	0,66 „

Tab. 38. **Eigenschaften des Sandes.**

(Siehe Tab. 35.)

Tab. 39. **Raumgewicht und Festigkeit.**

Mittelwerte aus je fünf Einzelversuchen.

Mörtelmischung (Raumteile)	1 Kalkteig + 3 Mauersand						1 Kalkteig + 5 Mauersand						1 Kalkteig + 7 Mauersand					
Wassergehalt	8,6 %						6,5 %						6,2 %					
Art des Mischens	Zugproben			Druckproben			Zugproben			Druckproben			Zugproben			Druckproben		
	28 Tage	3 Monate	6 Monate	28 Tage	3 Monate	6 Monate	28 Tage	3 Monate	6 Monate	28 Tage	3 Monate	6 Monate	28 Tage	3 Monate	6 Monate	28 Tage	3 Monate	6 Monate
Raumgewicht g/ccm																		
Handmischen	1,946	1,951	1,951	1,816	1,827	1,829	1,824	1,889	1,880	1,814	1,811	1,806	1,849	1,848	1,834	1,786	1,802	1,794
Maschinenmischen	2,034	2,037	2,037	1,970	1,982	1,986	1,940	1,945	1,949	1,899	1,908	1,906	1,909	1,917	1,886	1,867	1,870	1,867
Festigkeit kg/qcm																		
Handmischen	3,4	3,6	3,7	6,8	7,7	8,2	0,9	1,0	0,9	4,2	5,0	4,1	Ohne Festigkeit	0,9	0,8	2,0	3,2	2,8
Maschinenmischen	4,0	3,6	4,3	16,7	18,8	19,5	2,7	2,6	2,6	10,4	13,2	11,3	1,9	2,3	2,1	8,5	9,0	7,5
Verhältniszahlen. Festigkeit des von Hand gemischten Mörtels: 100																		
Maschinenmischen	118	100	116	246	244	238	300	260	289	248	264	276	—	256	263	425	281	268

Die ermittelten Werte zeigen deutlich den Einfluß der Mischart auf die Dichte (Raumgewicht) und auf die Festigkeit.

Dieser Einfluß macht sich in diesem Falle auch für die Zugfestigkeit durch den Unterschied in den Werten für Hand- und Maschinenmischung geltend, namentlich in den mageren Mischungen; die Verhältniszahlen (Tab. 39) geben über den Grad dieses Einflusses zahlenmäßigen Aufschluß. Fig. 23a veranschaulicht die Beziehungen zwischen Raumgewicht und Festigkeit.

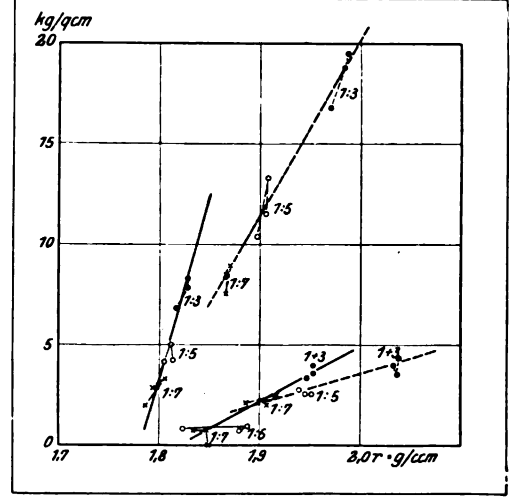


Fig. 23a.
Beziehungen zwischen Raumgewicht und Festigkeit nach Tab. 39.
—— Handmischen. ---- Maschinenmischen.

Beschaffenheit der Bausteine. Das im Mörtel enthaltene Wasser wird, wie bereits erwähnt, nach dem Vermauern von den Bausteinen zum Teil aufgesogen, wobei der Kalkteig mehr und mehr zusammenschrumpft, was engeres Aneinanderlagern der infolge des vorhandenen Wassers vorher weiter auseinanderliegenden Mörtelteilchen nach sich zieht und je nach dem Fettigkeitsgrade des Mörtels dessen spätere Festigkeit mehr oder minder beeinflußt. Dieses durch das Absaugen des Wassers bewirkte Eintrocknen und Festwerden des Mörtels ist das erste Stadium der Erhärtung und wird „Anziehen“ oder „Abbinden“ genannt.

In welchem Grade die Festigkeit von wasserreich angemachten Zementmörtelproben erhöht wird, wenn sie, statt auf dichten nicht absaugenden Unterlagen (Glas, Metall usw.) auf absaugenden (Ziegelsteinen, Gipsplatten usw.) in die Form gefüllt werden (Gießverfahren), ist bekannt.

Steine, die, wie z. B. einige Bruchsteinsorten, wenig oder gar kein Wasser aufsaugen, sind daher zum Vermauern in Kalkmörtel aus Luftkalk oder schwach hydraulischem Kalk wenig geeignet (Zementmörtel wird in solchem Falle mit weniger Wasser angemacht) oder wenigstens mit Vorsicht zu verwenden. Andererseits soll allerdings der Stein auch nicht zu porös (oder gegebenenfalls beim Vermauern nicht zu trocken) sein, damit nicht auf einmal zuviel Wasser und dies auch nicht zu schnell dem Mörtel entzogen wird.

Durch nachstehende Versuche mit Kalkmörtelproben, die unter verschiedenen Verhältnissen hergestellt wurden, sollte ermittelt werden, inwieweit die Festigkeit von Kalkmörtel durch das Absaugen des Wassers beeinflußt wird.

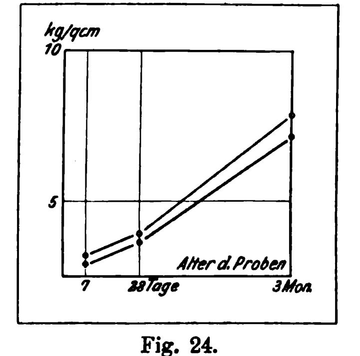


Fig. 24.
Festigkeit der Mörtel nach Tab. 40.
• und o Auf nicht absaugender Unterlage gefertigte Proben.

Fertiger, von einem Mörtelwerk bezogener Kalkmörtel wurde zum Teil in (Würfel-) Formen gefüllt, die auf nicht absaugenden Unterlagen (Eisenplatten), zum Teil in solche, die auf absaugenden Unterlagen (geebnete Dachziegel von Biberschwanzform) standen. Die Proben wurden nach zwei Tagen entformt und bei 7, 28 und 90 Tagen Alter der Druckprobe unterzogen.

Die Ergebnisse (Tab. 40 u. Fig. 24) lassen die Richtigkeit des oben Gesagten erkennen, wenn auch der Unterschied in der Festigkeit der nach verschiedenen Verfahren hergestellten Proben im vorliegenden Falle nicht erheblich ist. Immerhin ist der Einfluß der Wasserabsaugung auf die Festigkeit bewiesen.

Einfluß der Wasserentziehung auf die Festigkeit von Kalkmörtel.

Tab. 40. Festigkeit von Kalkmörtel[1]) im Anlieferungszustande, d. h. bei mörtelgerechter Verarbeitung.

Versuch Nr.	Auf nicht absaugender Unterlage in Formen gefüllt			Auf absaugender Unterlage in Formen gefüllt			Bemerkungen.
	Druckfestigkeit in kg/qcm nach						
	7 Tagen	28 Tagen	3 Monaten	7 Tagen	28 Tagen	3 Monaten	
1	2,4	3,9	7,4	3,1	3,4	7,5	Der Mörtel wurde in kellengerechtem Zustande in die Formen gefüllt.
2	3,1	2,8	7,0	2,9	3,2	8,2	
3	3,3	2,9	7,4	3,1	3,8	7,8	
4	2,6	3,8	7,4	3,1	4,3	8,1	
5	3,0	4,6	6,4	3,2	4,3	6,8	
Mittel	**2,9**	**3,6**	**7,1**	**3,1**	**3,8**	**7,7**	

[1]) Der Kalkmörtel war von einem Berliner Mörtelwerk bezogen. Die Prüfung des Mörtels auf mechanische Zusammensetzung ergab das Mischungsverhältnis: nach Gewichtsteilen = 1 : 4,2; nach Raumteilen = 1 : 1,2.



Druck der Mauersteinschichten. Daß die Auflast bezw. der Druck der aufgemauerten Steinschichten mit den Grad der Verdichtung des Fugenmörtels [1]) bedingt, ist ohne weiteres einleuchtend und durch praktische Erfahrungen hinlänglich bewiesen. Je größer jene Last und der durch sie bewirkte Druck ist, desto mehr wird der Mörtel zusammengepreßt, solange der Mörtel nicht abgebunden ist und nicht ausweichen kann. In den unteren Mauerwerksschichten ist der Mörtel dichter, als in höher gelegenen.

Statt kellengerechten Mörtels, wie er zum Vermauern verwendet wird, benutzt man für Festigkeitsprüfungen zum Einformen der Körper erdfeuchten Mörtel, der unter gewissen Bedingungen in die Formen eingeschlagen wird. Bei dieser Art der Mörtelbearbeitung hängt der Grad der Verdichtung des Mörtels von der aufgewendeten Schlagarbeit ab, die ihrerseits wieder bedingt ist durch die Schwere des Fallgewichts, die Fallhöhe, die Anzahl der Schläge (Stöße) und die Dicke bezw. Masse des einzuschlagenden Körpers. Mit Änderung einer dieser Faktoren ändert sich auch das Raumgewicht der Probekörper. Der Einfluß der Schlagarbeit auf die Festigkeit (Erhärtung) von Zementmörtel ist aus den Ergebnissen vieler Versuche bekannt [2]).

Einfluß der Schlagarbeit auf Dichte und Festigkeit der Luftkalkmörtel. Um die Wirkung verschiedener Schlagarbeit auf das Raumgewicht und die Festigkeit auch von Luftkalkmörtel zu ermitteln, wurden folgende Versuche mit zwei Kalksorten angestellt:

Aus Kalkpulver, gewonnen aus zwei Fettkalken mit 98,14 und 97,13 % Ätzkalkgehalt, und Mauersand wurden je zwei Mörtel in den Mischungsverhältnissen 1 : 2 und 1 : 4 nach Raumteilen in erdfeuchter Steife hergestellt und aus diesen Zug- und Druckprobekörper durch Einschlagen auf dem Normalhammerapparat gefertigt, und zwar unter Anwendung von

	Schlagzahl	Gesamtschlagarbeit m/kg *)	Schlagarbeit für die Raumeinheit m/kg/ccm	
			Zugprobe	Druckprobe
a	50	16,8	0,24	0,05
b	100	33,6	0,48	0,09
c	150	50,4	0,72	0,14

*) Das Gewicht des Böhmeschen Hammers beträgt 2 kg und die Hubhöhe 168 mm. Die Zugprobe hat 70 ccm, die Druckprobe 355 ccm Inhalt.

Die Körper lagerten an der Luft und wurden bei 28 Tagen, 3 Monaten und 6 Monaten Alter auf Gewicht (Raumgewicht) und Festigkeit geprüft.

Die Ergebnisse der Versuche sind in den Tab. 41—44 verzeichnet und diejenigen der Raumgewichts- und Festigkeitsprüfungen außerdem in Fig. 25 und 26 veranschaulicht. In diesen beziehen sich die ausgezogenen Linien auf Mischung 1 : 2 und die gestrichelten auf Mischung 1 : 4.

---

1) Mattern, Beitrag zur Beurteilung der Mörtelfestigkeit im Bauwerk. Zentralblatt der Bauverwaltung 1905. Nr. 10.

2) Gary, Die Ursachen der Abweichungen der Versuchsergebnisse der Zementgürtung an verschiedenen Orten. Mitt. Materialpr.-Amt 1900. Heft 1.



Einfluß der Schlagarbeit auf die Dichte und Festigkeit von Kalkmörtel.

Tab. 41. **Analyse der Kalke.**

(Bezogen auf den kohlensäure- und wasserfreien Zustand.)

Versuchsreihe	Herkunft des Kalkes	Kieselsäure und Unlösliches %	Eisenoxyd und Tonerde %	Ätzkalk %	Magnesia %	Schwefelsäureanhydrid %	Rest (Alkalien) %
1	Westfalen	0,13	0,24	98,14	0,66	0,50	0,30
2	Mähren	0,78	0,56	97,13	0,76	—	0,71

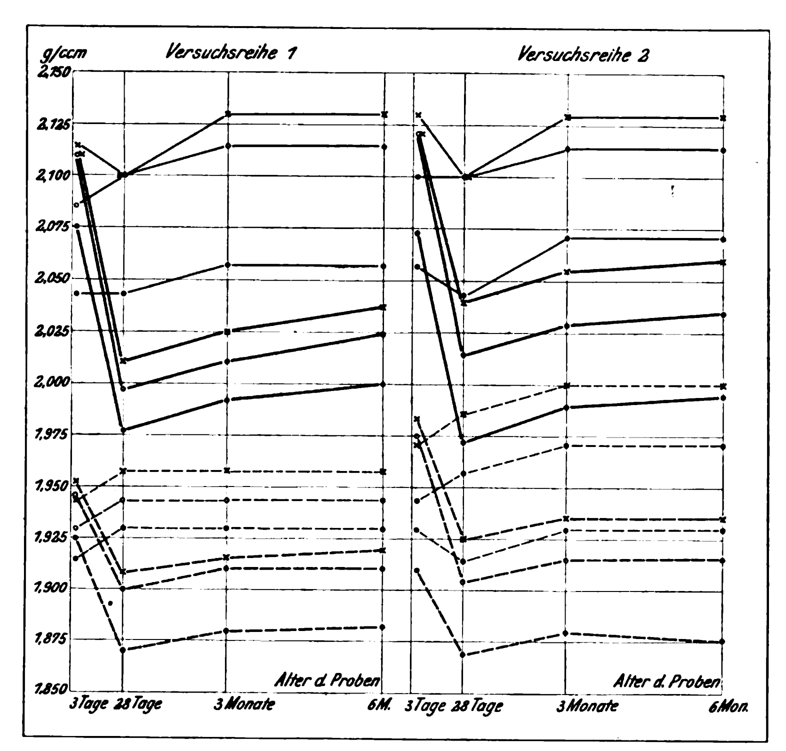


Fig. 25.

Ergebnisse der Raumgewichtsbestimmung nach Tab. 43.

——— Zugproben. ▬▬▬ Druckproben. – – – – Mischung 1 : 2. - - - - - - Mischung 1 : 4.

• Mit 50 Schlägen eingeschlagen.
o „ 100 „ „
× „ 150 „ „

Tab. 42. **Eigenschaften der Mörtelstoffe.**

<table>
<tr><th rowspan="3">Versuchsreihe</th><th rowspan="3">Mörtelstoff</th><th colspan="3">Gewicht für 1 l in kg</th><th rowspan="3">Spez. Gewicht s</th><th rowspan="3">Dichtigkeitsgrad d</th><th rowspan="3">Undichtigkeitsgrad u</th><th colspan="17">Korngröße</th></tr>
<tr><th rowspan="2">eingelaufen R_f</th><th rowspan="2">eingerüttelt R_r</th><th rowspan="2">eingefüllt [1] R_l</th><th rowspan="2">Rückstand %</th><th colspan="16">Siebe mit der übergeschriebenen Anzahl Maschen für 1 qcm</th></tr>
<tr><th colspan="2">20</th><th colspan="2">60</th><th colspan="2">120</th><th colspan="2">324</th><th colspan="2">600</th><th colspan="2">900</th><th colspan="2">5000</th><th colspan="2">S</th></tr>
<tr><td rowspan="2">1</td><td rowspan="2">Kalkpulver (Kalk aus Westfalen)</td><td rowspan="2">0,427</td><td rowspan="2">0,740</td><td rowspan="2">0,475</td><td rowspan="2">—</td><td rowspan="2">—</td><td rowspan="2">—</td><td>Auf den Sieben</td><td colspan="2">—</td><td colspan="2">0,0</td><td colspan="2">0,4</td><td colspan="2">1,4</td><td colspan="2">2,2</td><td colspan="2">2,8</td><td colspan="2">6,0</td><td colspan="2">—</td></tr>
<tr><td>Zwischen je 2 Sieben</td><td>—</td><td colspan="2">0,0</td><td colspan="2">0,4</td><td colspan="2">1,0</td><td colspan="2">0,8</td><td colspan="2">0,6</td><td colspan="2">3,2</td><td colspan="2">94,0</td><td>—</td></tr>
<tr><td rowspan="2">2</td><td rowspan="2">Kalkpulver (Kalk aus Mähren)</td><td rowspan="2">0,425</td><td rowspan="2">0,746</td><td rowspan="2">0,455</td><td rowspan="2">—</td><td rowspan="2">—</td><td rowspan="2">—</td><td>Auf den Sieben</td><td colspan="2">—</td><td colspan="2">—</td><td colspan="2">0,0</td><td colspan="2">2,0</td><td colspan="2">6,0</td><td colspan="2">8,0</td><td colspan="2">20,0</td><td colspan="2">—</td></tr>
<tr><td>Zwischen je 2 Sieben</td><td>—</td><td colspan="2">—</td><td colspan="2">0,0</td><td colspan="2">2,0</td><td colspan="2">4,0</td><td colspan="2">2,0</td><td colspan="2">12,0</td><td colspan="2">80,0</td><td>—</td></tr>
<tr><td rowspan="2">1 und 2</td><td rowspan="2">Freienwalder Rohsand [2])</td><td rowspan="2">1,575</td><td rowspan="2">1,849</td><td rowspan="2">1,610</td><td rowspan="2">2,655</td><td rowspan="2">0,697</td><td rowspan="2">0,303</td><td>Auf den Sieben</td><td colspan="2">0,0</td><td colspan="2">27,0</td><td colspan="2">54,5</td><td colspan="2">77,0</td><td colspan="2">—</td><td colspan="2">89,5</td><td colspan="2">—</td><td colspan="2">—</td></tr>
<tr><td>Zwischen je 2 Sieben</td><td>—</td><td colspan="2">27,0</td><td colspan="2">27,5</td><td colspan="2">22,5</td><td colspan="2">—</td><td colspan="2">—</td><td colspan="2">10,5</td><td colspan="2">—</td><td>—</td></tr>
</table>

1) Im 20 l-Gefäß ermittelt.
2) Gehalt an abschlämmbaren Stoffen: Spuren.

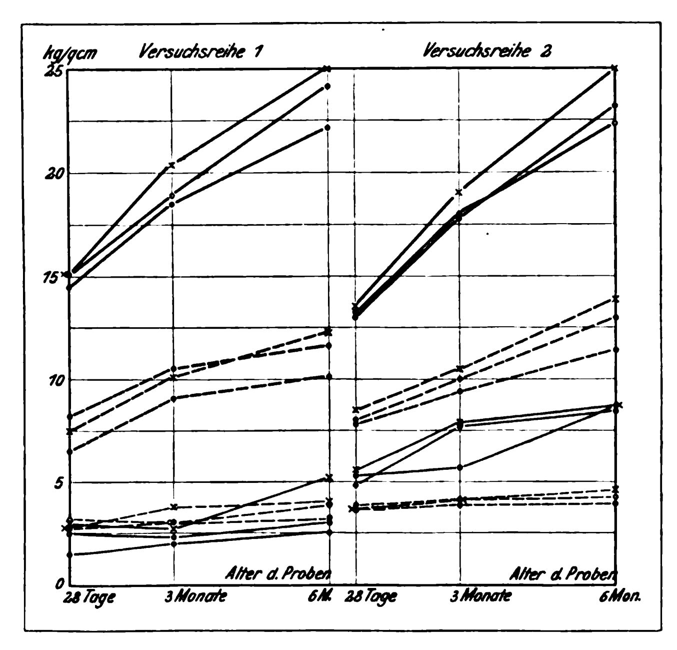


Fig. 26.

Ergebnisse der Festigkeitsversuche nach Tab. 44.

Zeichenerklärung wie in Fig. 25.

Tab. 43. **Raumgewichte der Körper zu Tab. 44.**

Mittelwerte aus je fünf Einzelversuchen.

Versuchsreihe	Anzahl der Schläge bei der Probenanfertigung	Zugproben				Druckproben			
		3 Tage	28 Tage	3 Monate	6 Monate	3 Tage	28 Tage	3 Monate	6 Monate
1 Kalk aus Westfalen	1 Raumteil Kalkpulver + 2 Raumteile Mauersand (9,0 % Wasser)								
	50	2,043	2,043	2,057	2,057	2,076	1,977	1,992	2,200
	100	2,086	2,100	2,114	2,114	2,110	1,997	2,011	2,023
	150	2,114	2,100	2,129	2,129	2,110	2,011	2,025	2,037
	1 Raumteil Kalkpulver + 4 Raumteile Mauersand (7,5 % Wasser)								
	50	1,914	1,929	1,929	1,929	1,924	1,870	1,879	1,882
	100	1,929	1,943	1,943	1,943	1,944	1,899	1,910	1,910
	150	1,943	1,957	1,957	1,957	1,952	1,907	1,915	1,918
2 Kalk aus Mähren	1 Raumteil Kalkpulver + 2 Raumteile Mauersand (9,0 % Wasser)								
	50	2,057	2,043	2,071	2,071	2,073	1,972	1,989	1,994
	100	2,100	2,100	2,114	2,114	2,121	2,014	2,028	2,034
	150	2,129	2,100	2,129	2,129	2,121	2,039	2,054	2,059
	1 Raumteil Kalkpulver + 4 Raumteile Mauersand (7,5 % Wasser)								
	50	1,929	1,914	1,929	1,929	1,910	1,868	1,879	1,876
	100	1,943	1,957	1,971	1,971	1,975	1,904	1,915	1,915
	150	1,971	1,986	2,000	2,000	1,983	1,924	1,935	1,935

Aus den Raumgewichten (Tab. 43 und Fig. 25) geht ohne weiteres der Einfluß der verschiedenen Schlagarbeit auf die Dichte (Raumgewicht) der Mörtel, die im Fettigkeitsgrad stark voneinander abwichen (Verhältnis 1 : 2 und 1 : 4), hervor.

Mit wachsender Schlagarbeit nimmt das r der Zug- und der Druckproben innerhalb der zur Prüfung gelangten Schlagzahlgrenzen zu.

Daß die Druckproben und zum Teil auch die Zugproben an Gewicht bezw. Raumgewicht anfänglich ab- und dann von einem gewissen Zeitpunkt an wieder zunehmen, ist ein an sich selbstverständliches Ergebnis, was bei allen Mörteln, die an der Luft erhärten, zu beobachten ist. Die Körper verlieren nämlich solange an Gewicht, bis das in ihnen enthaltene Anmachewasser (bei hydraulischen Mörteln bezw. Bindemitteln, soweit es nicht chemisch gebunden wird) verdunstet ist, und nehmen von diesem Zeitpunkt an, infolge der Kohlensäureaufnahme, an Gewicht wieder zu und zwar solange bis eben das gesamte oder das von der Kohlensäure der Luft erreichbare Kalkhydrat in kohlensauren Kalk übergegangen ist. Daß die Kohlensäureaufnahme und infolgedessen auch die Gewichtszunahme bei den fetten, d. h. mehr Kalk enthaltenden Mörteln größer ist, als bei den mageren, ist ebenfalls natürlich. Die Zugprobekörper erlangen höheres r, als die entsprechenden Druckprobekörper, ein Ergebnis, das schon in der Art der Anfertigung, d. h. dem verschiedenen Maße der für beide Probearten aufgewendeten Schlagarbeit begründet ist (siehe Tabelle S. 75).

· Prozentual ist die Raumgewichtssteigerung mit zunehmender Schlagarbeit gering, wie aus den Verhältniszahlen (Tab. 45) hervorgeht[1]).

Tab. 44. Festigkeit.

Mittelwerte aus je fünf Einzelversuchen.

Versuchsreihe	Anzahl der Schläge bei der Probenanfertigung	Zugfestigkeit in kg/qcm nach			Druckfestigkeit in kg/qcm nach			Verhältnis $\frac{Zug}{Druck}$ für		
		28 Tagen	3 Monaten	6 Monaten	28 Tagen	3 Monaten	6 Monaten	28 Tage	3 Monate	6 Monate
1 Kalk aus Westfalen	1 Rtl. Kalkpulver + 2 Rtl. Mauersand (9,0 % Wasser)									
	50	1,5	2,0	2,4	14,5	18,5	22,1	1/9,7	1/9,3	1/9,2
	100	2,5	2,3	3,0	15,1	18,9	24,1	1/6,0	1/8,2	1/8,0
	150	2,9	2,7	5,1	15,1	20,3	24,9	1/5,2	1/7,5	1/4,9
	1 Rtl. Kalkpulver + 4 Rtl. Mauersand (7,5 % Wasser)									
	50	2,8	3,1	3,1	6,5	9,1	10,0	1/2,3	1/2,9	1/3,3
	100	3,2	3,1	3,8	8,2	10,5	11,6	1/2,6	1/3,3	1/3,1
	150	2,8	3,7	4,0	7,5	10,1	12,2	1/2,7	1/2,7	1/3,1
2 Kalk aus Mähren	1 Rtl. Kalkpulver + 2 Rtl. Mauersand (9,0 % Wasser)									
	50	5,3	5,7	8,7	13,1	17,8	23,1	1/2,5	1/3,1	1/2,7
	100	4,9	7,7	8,5	13,2	18,0	22,3	1/2,7	1/2,3	1/2,6
	150	5,6	7,8	8,7	13,5	19,0	24,9	1/2,4	1/2,4	1/2,9
	1 Rtl. Kalkpulver + 4 Rtl. Mauersand									
	50	3,7	3,9	4,0	7,8	9,4	11,4	1/2,1	1/2,4	1/2,9
	100	3,8	4,1	4,3	8,0	10,0	13,0	1/2,1	1/2,4	1/3,[illegible]
	150	3,7	4,1	4,6	8,5	10,4	13,8	1/2,3	1/2,5	1/3,0

Weniger gesetzmäßig als die Veränderung der Dichtigkeitsverhältnisse mit veränderter Schlagzahl, ist die der Festigkeitseigenschaften der Mörtel; denn, wie die durchschnittlichen Festigkeitswerte (Tab. 44) und namentlich der Verlauf der sie darstellenden Schaulinien (Fig. 26) zeigen,

[1]) Von einem gewissen Fettigkeits- oder vielmehr Magerkeitsgrad an wird überhaupt keine weitere Verdichtung des Mörtels und daher keine Raumgewichtssteigerung mehr stattfinden, da der Sand im Mörtel, sobald seine Hohlräume nicht mehr ausgefüllt sind, sich nur auf ein gewisses Maß zusammenpressen läßt, gleichviel wie wenig Kalkhydrat vorhanden ist.

sind die Unterschiede in den Festigkeiten der mit verschiedener Schlagzahl gefertigten Proben unerheblich. In einem Falle (Reihe 1, Mischung 1 : 4) haben sogar die mit einer größeren Anzahl Schläge (150) hergestellten Proben geringere Festigkeiten ergeben, als die mit einer kleineren Anzahl Schläge (100) gefertigten.

Tab. 45. Verhältniszahlen der Raumgewichte und Festigkeiten nach Tab. 43 und 44.

Werte der mit 50 Schlägen gefertigten Proben = 100.

Versuchsreihe	Mörtelmischung	Anzahl der Schläge	Zugproben				Druckproben			
			3 Tage	28 Tage	3 Monate	6 Monate	3 Tage	28 Tage	3 Monate	6 Monate
			Raumgewichte							
1	1 : 2	50	100	100	100	100	100	100	100	100
		100	2	3	3	3	2	1	1	1
		150	3	3	4	4	2	2	1	2
	1 : 4	50	100	100	100	100	100	100	100	100
		100	1	1	1	1	1	2	2	1
		150	2	1	1	1	2	2	2	2
2	1 : 2	50	100	100	100	100	100	100	100	100
		100	2	3	2	2	2	2	2	2
		150	3	3	3	3	2	3	3	3
	1 : 4	50	100	100	100	100	100	100	100	100
		100	1	2	2	2	3	2	2	2
		150	2	4	4	4	4	3	3	3
			Festigkeit							
1	1 : 2	50	—	100	100	100	—	100	100	100
		100	—	167	115	125	—	104	102	109
		150	—	193	135	213	—	104	110	112
	1 : 4	50	—	100	100	100	—	100	100	100
		100	—	114	103	123	—	126	115	109
		150	—	100	119	129	—	115	111	115
2	1 : 2	50	—	100	100	100	—	100	100	100
		100	—	92	135	98	—	101	101	97
		150	—	106	137	100	—	103	107	108
	1 : 4	50	—	100	100	100	—	100	100	100
		100	—	103	105	107	—	103	107	114
		150	—	100	105	115	—	109	111	121

Jedenfalls entspricht die Festigkeitszunahme nicht der Schlagarbeitssteigerung, wie zahlenmäßig aus den Verhältniszahlen der Tab. 45 hervorgeht; wenigstens steht

sie in keinem Verhältnis zu der Festigkeitssteigerung, die bei ähnlichen Versuchen mit Zementmörtel erzielt worden ist. (Siehe Mitt. Materialpr.-Amt 1898. S. 1 ff.)

Das Verhalten der Kalkmörtel in dieser Beziehung läßt sich vielleicht mit der Annahme erklären, daß die unter Aufwendung einer größeren Schlagzahl gefertigten Proben zu stark verdichtet und infolgedessen für die Erhärtung, d. h. die Kohlensäureaufnahme ungeeigneter gemacht werden, als die weniger stark verdichteten.

Mit diesen Verhältnissen müßte man gegebenenfalls bei Aufstellung von Vorschriften für Prüfung von Luftkalkmörteln auf Festigkeit rechnen.

g) Einfluß der Art der Erhärtung auf die Festigkeit von Luftkalkmörtel.

Theorie der Erhärtung von Luftkalkmörtel. Man denkt sich den Vorgang der Erhärtung von Luftkalkmörtel ziemlich einfach. Der in Form von Kalkhydrat im Mörtel vorhandene ziemlich wasserreiche Kalkteig schrumpft nach dem Vermauern des Mörtels infolge der Wasserabgabe an die Mauersteine und an die umgebende Luft zusammen; er schwindet. Man nennt diesen Übergang des Mörtels aus dem weichen, beweglichen Zustand in den festen, starren „Anziehen“ oder „Abbinden“. Dieser rein mechanische Vorgang ist jedoch nicht identisch mit dem beim Anmachen von Zement mit Wasser sich abspielenden, ebenfalls mit „Abbinden“ bezeichneten Prozeß und ist daher mit diesem nicht zu verwechseln; denn das Abbinden des Zementes beruht im wesentlichen auf einem chemischen Vorgange (chemische Wasserbindung).

Das eigentliche Abbinden des Kalkes ist dem Prozeß des Anziehens des Mörtels schon vorausgegangen, wenn man den Vorgang des Ablöschens, das ebenfalls wie das Abbinden beim Zement nichts anderes als eine chemische Wasserbindung ist, als Abbinden betrachtet, wie es Knapp[1]) tatsächlich tut. Wir kommen auf diesen Punkt noch besonders zurück.

Infolge des Schwindens des Kalkteiges lagern sich die Sandteilchen enger aneinander und der Mörtel verdichtet sich, wobei der Druck der Mauersteine begünstigend einwirkt. Auf diese Weise kommt das „Setzen“ des Mauerwerks zustande.

Der weitere Abschnitt des Festwerdens, das eigentliche „Erhärten“, des Kalkmörtels beruht auf der allmählichen Umwandlung des vorhandenen Kalkhydrates in kohlensauren Kalk durch Aufnahme von Kohlensäure aus der Luft.

Dieser chemische Vorgang, der von einer Wasserabgabe ($CaOH_2$ geht durch die Aufnahme von CO_2 über in $CaCO_3$ und H_2O) begleitet ist, spielt sich nur sehr langsam ab, und zwar in dem Grade langsamer, in dem sich die Schicht kohlensauren Kalkes verdickt und der Luft d. h. der Kohlensäure der Zutritt zum Kalkhydrat im Mörtel erschwert wird.

Bekannt ist, daß häufig in sehr dicken Mauern der Kalk noch nach Jahrhunderten als Kalkhydrat vorhanden ist.

Trotz der bei der Erhärtung, d. h. der Zersetzung des Kalkhydrates vor sich gehenden Wasserabsonderung schreitet der Übergang des Hydrates in Karbonat nur dann nennenswert fort, wenn dem Mörtel von Zeit zu Zeit Feuchtigkeit zugeführt

[1]) Feichtinger, Die chemische Technologie der Mörtelmaterialien, S. 74 und Dinglers polytechn. Journ. 1871. S. 513 ff.

wird, wie denn z. B. bekannt sein dürfte, daß der Mörtel an derjenigen Seite von Mauern, die dem Regen am meisten ausgesetzt ist, weit fester wird als an solchen, die mit Feuchtigkeit wenig oder gar nicht in Berührung kommen.

Aus dieser Darstellung des Erhärtungsvorganges ist ersichtlich, erstens, daß späteres nennenswertes Festwerden des Kalkmörtels nur gewährleistet werden kann, wenn er infolge des Anziehens (Eintrocknens) einen gewissen Zusammenhang (Dichte) erlangt hat, und zweitens, daß die Aufnahme von Kohlensäure durch das Kalkhydrat nur bei einem gewissen Feuchtigkeitszustande des Mörtels vor sich geht.

Was die Energie der Kohlensäureaufnahme anbetrifft, so hat bereits Wolters auf dem Versuchswege festgestellt, daß diese wesentlich durch den Wassergehalt des Mörtels beeinflußt ist. Frisch angemachter Mörtel nimmt nach den Beobachtungen des genannten Forschers mit vollem Wassergehalt nicht über $^1/_2$ % Kohlensäure auf und ist daher unfähig, zu erhärten; erst wenn ein Teil des Wassers durch Austrocknung (beim Abbinden) entfernt ist, findet wirksame Kohlensäureaufnahme statt. Andererseits reagieren trockenes Kalkhydrat und völlig trockene Kohlensäure nicht aufeinander; erst die Zufuhr von Wasser bewirkt Aufnahme der Kohlensäure durch Kalk. Nach Wolters[1]) ist 1 v. H. der günstigste Wassergehalt.

Nach den Untersuchungen desselben Forschers ist nur tropfbar flüssiges (nicht dampfförmiges) Wasser geeignet, die Verbindung der Kohlensäure mit dem Kalkhydrat zu bewirken.

Lehmann und Nußbaum[2]), die auch nach dieser Richtung wissenschaftliche Untersuchungen ausgeführt haben, stellten gleichfalls fest, daß die Aufnahme der Kohlensäure durch den Kalkmörtel nur bei einem bestimmten Wassergehalt (0,6 bis etwa 8 v. H.) erfolgt und daß ein lebhafter, für Bauzwecke irgendwie in Betracht kommender Erhärtungsverlauf nur stattfindet bei einem Wassergehalt des Mörtels von mehr als 1 v. H. und weniger als 6 v. H.

„Der Ätzkalk", sagt Nußbaum[3]), „vermag die Kohlensäure nur bei einem ganz bestimmten Feuchtigkeitsgehalt zu binden. Solange die feinen Hohlräume des Mörtels mit Wasser gefüllt sind, findet eine Überführung von Ätzkalk in kohlensauren Kalk überhaupt nicht statt und ebenso hört dieser Vorgang vollkommen auf, sobald der Wassergehalt des Mörtels auf 0,6 % seines Gewichtes gesunken ist."

Sehr wichtig ist der Sand, weil dieser einerseits größere Anhäufungen von Kalkteig verhindert[4]), andererseits den Mörtel für die Kohlensäureaufnahme geeigneter macht. Wie wir oben gesehen, ist denn auch die Festigkeit des Kalksandgemisches (bis zu einem gewissen Sandzusatz) höher, als die des reinen Kalkes.

Einige Forscher (v. Fuchs, Koßmann und Hauenschild) nehmen bei der Erhärtung von Luftkalk die Bildung eines basischen Hydrokarbonats ($CaCO_3, OH_2$ bezw. $3\,CaCO_3, 2\,CaOH_2$) an, während Wittstein, Michaelis und Schoch[5]) den Erhärtungsvorgang als auf der Kohlensäurebildung beruhend erklären.

Erhärtung des Luftkalkmörtels durch Silikatbildung. Von verschiedenen Seiten ist die Hypothese aufgestellt worden, daß die Erhärtung der

---

1) Untersuchungen über das Verhalten des Mörtels zur Kohlensäure. Dinglers polytechn. Journ. Bd. 196. S. 344 und Feichtinger. 1885. S. 72—74.

2) K. B. Lehmann und H. Chr. Nußbaum, Studien über Kalkmörtel und Mauerfeuchtigkeit. Archiv f. Hygiene. Bd. 9. S. 139 u. 223.

3) Die Erhärtung des Kalkmörtels. Beilage zu Nr. 33 der Zeitschr. f. Architektur- u. Ingenieurwesen 1897.

4) Schoch, Die moderne Aufbereitung der Mörtelmaterialien. 1904. S. 128. Verlag d. Tonindustrie-Zeitung, Berlin.

5) Schoch, Die moderne Aufbereitung der Mörtelmaterialien. 1904. S. 128. Verlag d. Tonindustrie-Zeitung, Berlin.



Luftkalkmörtel zum Teil auch auf dem Entstehen von kieselsaurem Kalk beruhe, dessen Bildung neben der von kohlensaurem Kalk während der Erhärtung vor sich gehe; und zwar stützt sich diese Anschauung auf die Ergebnisse der Untersuchung alter Mörtel, wie solche von Schrötter[1]), Petzholdt[2]) und anderen Forschern vorgenommen sind und die das Vorhandensein von löslicher Kieselsäure in diesen Mörteln in mehr oder weniger beträchtlichen Mengen ergeben haben. Die Bildung des kieselsauren Kalkes wurde der ätzenden Wirkung des Kalkhydrates auf den Quarzsand zugeschrieben.

Diese Anschauung hat sich, obgleich sie von den verschiedensten Seiten als irrig widerlegt worden ist, bis in die neueste Zeit selbst unter Fachleuten erhalten.

Noch 1884 suchte Baurat Mothes in der Töpfer- und Ziegler-Zeitung an Hand der Ergebnisse von Untersuchungen mit Mörtel verschiedenen Alters nachzuweisen, daß das Kalkhydrat bezw. der kohlensaure Kalk im Mörtel mit dem Sande im Laufe der Zeit sich zu Kalksilikat verbindet. Gegenüber den von Mothes mitgeteilten Werten für den Gehalt an Kieselsäure weist Cramer[3]) darauf hin, daß das Vorhandensein von löslicher Kieselsäure kein Beweis für dessen Bildung aus dem Quarz ist; denn sie kann sowohl aus dem Kalk (der in Berlin und Umgegend vielfach gebräuchliche Rüdersdorfer Fettkalk hat z. B. bis zu 4 % Kieselsäure), als auch aus den Mörteln beigemischten Zuschlagstoffen stammen, die von vornherein lösliche Kieselsäure enthalten.

Bereits Winkler und Feichtinger[4]) vertreten den Standpunkt, daß die in alten Mörteln gefundene aufgeschlossene Kieselsäure häufig auf den Tongehalt des zur Verwendung gelangten Kalkes zurückzuführen ist.

In dem Chemischen Laboratorium für Tonindustrie zu Berlin sind verschiedentlich Prüfungen alter Mörtel aus Luftkalk ausgeführt worden, bei denen nur geringe Gehalte an löslicher Kieselsäure im Mörtel festgestellt wurden. Z. B. ergab die Untersuchung von 200 Jahre altem Mörtel[5]) aus Rüdersdorfer Kalk in einem Falle 0,3 und in zwei Fällen 0,5 % lösliche Kieselsäure. Weitere Versuche bestätigten diese Ergebnisse[6]).

In neuerer Zeit hat sich namentlich Nußbaum[7]) mit der Untersuchung von Mörteln aus Bauwerken des Mittelalters beschäftigt und hierbei in den Mörteln, die sich durch besonders hohe Festigkeit auszeichneten, einen so hohen Gehalt an löslicher Kieselsäure gefunden, daß nach seiner Meinung von einem zufälligen Hineingeraten derselben in die Mörtel unter keinen Umständen die Rede sein kann.

„Da die zum Mauerwerk verbundenen Steine oder Ziegel vielfach weder Quarz noch sonstige Bestandteile aufwiesen, aus denen Kieselsäure durch Aufschließung (unter der Einwirkung des Ätzkalkes) in dem Mörtel übergegangen sein konnte, so muß die Kieselsäure in irgend einer Form (Puzzolan, Traß, Ziegelmehl u. dgl.) dem Kalkmörtel absichtlich zugesetzt sein."

Die Verwendung solcher Mörtel im Mittelalter begründet Nußbaum mit den hervorragenden Kenntnissen, die man zu jener Zeit von den zum Errichten von Bauwerken dienenden Körpern und Stoffen hatte, und mit den reichen Er-

---

1) Feichtinger. 1885. S. 77.
2) Tonindustrie-Zeitung 1894. Nr. 13. S. 296—297.
3) Tonindustrie-Zeitung 1894. Nr. 13. S. 296—297.
4) Feichtinger. 1885. S. 77.
5) Tonindustrie-Zeitung 1894. Nr. 13. S. 297.
6) Tonindustrie-Zeitung 1904. Nr. 140. S. 1635.
7) Die Erhärtung der Kalkmörtel. Beilage zu Nr. 33 der Zeitschr. f. Architektur- u. Ingenieurwesen 1897. S. 406.

fahrungen, über die man für die Mörtelbereitung und die Erhärtungsweise der verschiedenen hierzu benutzten Stoffe damals verfügte.

Daß im übrigen eine chemische Bindung des Kalkhydrates mit dem Quarzsand, d. i. unlösliche (unaufgeschlossene) Kieselsäure, zu Kalkhydrosilikat unter gewöhnlichen Verhältnissen nicht vor sich geht, hat zuerst Michaelis festgestellt. Ferner hat Donath[1]) durch planmäßige Untersuchungen, die über die chemische Bewertung des Mörtelsandes im allgemeinen und über die Angreifbarkeit der quarzigen Kieselsäure durch Ätzkalk im besonderen Aufschluß geben sollten, zuverlässig nachgewiesen, daß absolut reiner Quarzsand durch Ätzkalk, selbst nach langer Einwirkungsdauer, keine chemische Veränderung (unter Bildung von Kalksilikat) und demnach keine Überführung in lösliche Kieselsäure erfährt.

Das Aufschließen des Quarzsandes, d. h. das Entstehen löslicher Kieselsäure aus solchem Sand durch Einwirkung von Kalkhydrat kann vielmehr, wie ebenfalls zuerst Michaelis und später Glasenapp[2]) nachgewiesen haben, nur unter Einwirkung hoher Wärme (über 100° C), die Gegenwart von Feuchtigkeit vorausgesetzt, und demzufolge auch bei hoher Dampfspannung vor sich gehen. Unter solcher Beanspruchung wirkt der Kalk aufschließend auf die Kieselsäure. (Patent Michaelis, D. R.-P. 14195 vom 5. Oktober 1880)[3]).

Gelegentlich der in der Abteilung für Baumaterialprüfung ausgeführten Untersuchungen von Kalkmörteln, die nachweislich aus reinem Quarzsand und reinem Luftkalk bereitet waren, konnte ebenfalls mehrfach festgestellt werden, daß irgendwelche Bildung von löslicher Kieselsäure (die Verbindung „kieselsaurer Kalk" läßt sich als solche auf chemischem Wege nicht nachweisen) innerhalb der zur Anwendung gelangten Erhärtungszeiten (bis zu einem Jahr) nicht vor sich gegangen war.

Die früher vorherrschende Anschauung, daß die Bildung löslicher Kieselsäure an der Erhärtung der Luftkalkmörtel teilnehme, entbehrt somit jeder Begründung.

Aus der großen Zahl der im zweiten Teil dieses Aufsatzes in Tab. 57 enthaltenen Ergebnisse und aus denen der übrigen vorstehend mitgeteilten Versuche läßt sich der Grad des Erhärtungsvermögens von Luftkalkmörtel wenigstens innerhalb eines gewissen Zeitraumes (ein Jahr) verfolgen. Diese Ergebnisse bilden eine Stütze für die landläufige Anschauung von dem Erhärtungsvorgange bei den genannten Mörteln.

Hydraulische Erhärtung des Kalkmörtels. Unter Umständen soll auch Luftkalk imstande sein, hydraulisch zu erhärten. Im allgemeinen spricht man diese Eigenschaft nur solchen Bindestoffen zu, die sogenannte Wasserbildner (Hydraulefaktoren) enthalten, d. h. Stoffe, die mit Kalk bei Gegenwart von Wasser wasserbeständige Verbindungen eingehen. Als solche Stoffe gelten: Kieselsäure (aufgeschlossene bezw. aufschließbare), Eisenoxyd, Tonerde und Magnesia.

Was die Möglichkeit der hydraulischen Erhärtung anbetrifft, so haben bereits mehrere Forscher auf die Fähigkeit der Luftkalke, hydraulisch zu erhärten, hingewiesen. Zu dieser Anschauung hat sich schon v. Fuchs[4]) bekannt, der

[1]) Die chemische Bewertung des Mörtelsandes. Tonindustrie-Zeitung 1900. Nr. 3. S. 22 und Nr. 6. S. 56 ff.

[2]) Untersuchungen über Kalksandsteine. Mitteilungen aus dem chemischen Laboratorium des Polytechnikums zu Riga. Tonindustrie-Zeitung 1904. Nr. 44. S. 447 ff.

[3]) Das Patent Michaelis: „Ich mische Sand oder irgend eine Modifikation der Verbindung der Kieselsäure mit 10—40 Gewichtsprozenten Kalkhydrat usw." bildet die Grundlage für die gesamte Kalksandsteinerzeugung nach dem Hochdruckverfahren.

[4]) Feichtinger. 1885. S. 75.

beobachtet haben will, daß der Kalk bei unvollständigem Brennen und der gebrannte Kalk bei der Aufnahme von Kohlensäure eine basische Verbindung bildet, da sich eine unvollkommen gesättigte und unvollkommen „entkohlensäuerte" Verbindung mit Wasser nicht löscht und diese Verbindung mehr oder minder hydraulische Eigenschaften besitzt. Dieser Anschauung schließt sich Hauenschild[1]) an, der sogar festgestellt haben will, daß sich unter günstigen Umständen wohlcharakterisierte, wasserhelle Kristalle, die im Wasser unlöslich sind, bilden, wenn Kalkhydrat mit kohlensäurehaltigem Wasser zusammenkommt. Knapp und Schott haben versucht, Luftkalk zur hydraulischen Erhärtung zu veranlassen. Über diese Versuche und deren Ergebnisse berichtet Knapp in Dinglers polytechnischem Journal[2]).

Knapp geht von der Ansicht aus, daß mit der Erstarrung (Abbinden) und Versteinerung (Erhärtung) der hydraulischen Bindestoffe in allen Fällen die Bildung von Hydrat Hand in Hand gehe. Die Möglichkeit der Versteinerung setzt also das Vorhandensein einer Verbindung voraus, die fähig ist, sich mit Wasser chemisch zu vereinigen und zwar in der für die Versteinerung geeigneten Weise.

„In einigen Fällen", sagt Knapp, „konstruiert sich jeder wasserbindende Körper erst unter dem Einfluß des die Erhärtung vermittelnden Wassers; dahin gehören die praktisch wichtigsten Wassermörtel, die hydraulischen Kalke mit dem Romanzement, die Portlandzemente und die Mörtel mit Traß usw. Bei allen diesen entsteht unter dem Einfluß des zugesetzten Wassers durch Umsetzung des chemischen Bestandes ein Silikat aus den verschiedenen vorhandenen Basen, welches im Augenblick seiner Entstehung Wasser chemisch bindet. In anderen Fällen ist eine zur Aufnahme von Hydratwasser bestimmte Verbindung fertig vorhanden, welche sich bei der Erhärtung einfach in Hydrat verwandelt. Allerdings ist für die steinige Erhärtung der genannten Materialien und ähnlichen praktischen Werten neben der Bindung des Wassers auch die Aufnahme von Kohlensäure (Bildung von kohlensaurem Kalk) ein hochwichtiges Moment[3])."

Wesentlich für die Fähigkeit, hydraulisch zu erhärten, ist nach Knapp der Grad der Dichte, mit der die Bindemittelteilchen aneinander lagern, ein Moment, das nach seiner Ansicht bei der Erforschung der Verhältnisse, die die hydraulische Erhärtung bedingen, zu wenig berücksichtigt wird.

Er sagt:

„Man hat den chemischen Prozeß bei der Erhärtung von dem mechanischen Prozeß nicht gehörig unterschieden, ja beide in der Regel stillschweigend und ohne weiteres identifiziert gegen alle Regeln der Logik.

Daraus, daß ein Körper oder ein Gemenge Hydratwasser bindet, folgt noch keineswegs, daß ein Pulver Zusammenhang gewinnt oder eine bestimmte Härte annimmt, man kennt im Gegenteil Körper, wie den gebrannten Kalk, welche bei der Aufnahme von Wasser den Zusammenhang verlieren und zum zartesten Mehl oder Schlamm auseinandergehen. Der chemische Prozeß der Bindung von Wasser geht der steinartigen Erhärtung immer voraus, aber die steinige Erhärtung ist keineswegs immer in allen Fällen Folge der Bindung von Wasser. Nur wenn bei diesem chemischen Prozeß zugleich die mechanische Lagerung und Anordnung der Teilchen so entfällt, daß sie mit hinreichender Kraft aneinander haften können, wird die Versteinerung möglich sein. Der chemische Prozeß, welcher beim Zusammenbringen der hydraulischen Stoffe sich betätigt, ist nur die Gelegenheit der damit eventuell eintretende mechanische Prozess, die wahre und unmittelbare Ursache der Erhärtung."

Im vorstehenden deutet also Knapp schon an, daß auch er das Ablöschen des Luftkalkes, den man gleichsam als das typische Gegenteil eines hydraulischen

---

[1]) Hauenschild, Katechismus der Baumaterialien. II. T. Die Mörtelsubstanzen. 1879. S. 108—109. Verlag Lehmann & Wentzel, Wien.

[2]) Dinglers polytechn. Journ. 1871. S. 513 ff.

[3]) Auf letztere Tatsache habe ich bereits in meiner Arbeit „Hydraulische Kalke", Mitt. Materialpr.-Amt 1902, hingewiesen.

Körpers zu betrachten pflegt, bei der Berührung mit Wasser für eine Art hydraulische Erhärtung hält.

„In der Tat folgt beim gewöhnlichen Löschen des Kalkes anstatt der Bindung vielmehr ein Zerfallen in der äußersten Zerteilung unter mächtigem Aufquellen. Diese Erscheinung ist indes nur in zufälligen äußeren mechanischen Ursachen bedingt und man kann den gebrannten Kalk sehr wohl durch Wegräumen dieser Ursachen auf rein mechanischem Wege zu einem hydraulischen Verhalten zwingen."

Den Beweis für diese Behauptung lieferte Knapp durch folgenden Versuch: Er füllte bis zur Mehlfeinheit zerkleinerten gebrannten Kalk (Ätzkalk) in ein starkwandiges, oben und unten mit Schrauben verschließbares Eisenrohr von konischer Form, das zum leichteren Auseinandernehmen der Länge nach aus zwei Teilen bestand. Die Wandungen waren mit feinen Öffnungen versehen (siehe Fig. 27). Das Kalkpulver wurde fest eingestampft und das Rohr nach dem Schließen der Schrauben in Wasser gelegt und einige Stunden darin belassen. Nach dem Herausnehmen fand man den Kalk in einen festen Stab verwandelt, der nach dem Trocknen bei 120° C in kohlensäurefreier Luft eine größere Härte erlangte als gewöhnliche Kreide. Der also hydraulisch erhärtete Kalk zeigte keinerlei Neigung rissig zu werden oder zu zerfallen.

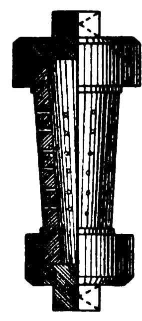


Fig. 27.

Bemerkenswert in dieser Beziehung und zugleich beweisend dafür, daß man den gebrannten ungelöschten Kalk zu einem ähnlichen Verhalten veranlassen kann, wie es Zement beim Anmachen mit Wasser zeigt, ist folgender von Dr. Berkhoff vorgeschlagene Versuch:

Macht man bis zur Mehlfeinheit zerkleinerten Ätzkalk mit Wasser zu einer weichen plastischen Masse (etwa in Kugelform) an, so geht diese allmählich unter mehr oder minder starker Erwärmung zunächst in eine feste, starre, zusammenhängende Masse über, die jedoch, falls man sie sich selbst überließe, infolge im Innern erzeugter Dampfentwicklung (Löschen) rissig werden, zerklüften und zerfallen würde.

Bei diesem Vorgange findet also auch wie beim Zement „Abbinden" statt, indem die mit Wasser angemachte Kalkmasse unter chemischer Wasserbindung aus dem weichen beweglichen in den festen unbeweglichen Zustand übergeht.

Wird nun aber die Masse in dem Augenblick, in dem sie in den starren Zustand übergeht — also ehe Rißbildung eintritt —, statt sie sich zerklüften zu lassen, schnell abgekühlt (durch Übergießen mit kaltem Wasser), so tritt die vorerwähnte Raum- und Formveränderung (Aufquellen und Zerfallen) nicht ein, sondern die Masse bleibt fest, erlangt sogar meßbare Härte und zeigt keinerlei Treiberscheinung.

Einen zementartigen (also hydraulisch) erhärtenden Mörtelbildner aus Luftkalk will Cramer erzielen, indem er den Kalk unvollständig hydratisiert, also mit weniger Wasser ablöscht, als sonst zur völligen Umwandlung des Ätzkalkes in Kalkhydrat erforderlich wäre. Cramer[1]) hat sich dieses Verfahren, wassererhärtenden Luftkalk darzustellen, patentieren lassen. Der Patentanspruch lautet:

„Verfahren, gebrannten Weißkalk wassererhärtend zu machen, dadurch gekennzeichnet, daß der pulverisierte Kalk gleichmäßig mit weniger Wasser oder Dampf in Berührung gebracht wird, als zur Überführung in das Hydrat (CaH_2O_2) notwendig ist."

---

[1]) Tonindustrie-Zeitung 1901. Nr. 42. S. 620.

Ein Zusatzpatent zu vorstehendem hat folgenden Anspruch:

„Verfahren. Form des Verfahrens zur Darstellung von wassererhärtendem Weißkalk nach Patent 118856 dadurch gekennzeichnet, daß pulverförmiger Ätzkalk mit trockenem, gelöschtem Kalk zusammengemischt wird."

Nach Cramer[1]) haben weitere Versuche ergeben, daß ein ähnliches Erzeugnis, wie das nach dem patentierten Verfahren hergestellte, gewonnen wird durch Zusammenbringen von Stückkalk mit einer zum Hydratisieren nicht ausreichenden Menge Wasser in geschlossenem Gefäße. (Das hierbei entstehende körnige Erzeugnis muß angeblich vor seiner Verwendung gemahlen werden.)

Zahlenmäßige Angaben, die als Unterlagen für die Beurteilung des praktischen Wertes der Cramerschen Erfindungen dienen können, sind nicht bekannt geworden. Wohl aber ist bekannt, daß man schon in der Mitte des achtzehnten Jahrhunderts Mörtel aus gelöschtem Kalk und Sand oder andere Magerungsstoffe (Ziegelsand usw.) unter Zusatz von ungelöschtem Kalk hergestellt hat. Ein solcher Mörtel war der sogenannte Loriotsche Mörtel[2]), bestehend aus zwei Raumteilen durchgesiebtem Ziegelsand, zwei Raumteilen feinem Sand mit soviel abgelöschtem Kalk

„in ausreichender Menge, um mit den beiden ersten Ingredienzen und dem Wasser in der Grube einen Mörtel von gewöhnlicher Konsistenz zu erhalten, welcher hinreichende Feuchtigkeit besitzt, um den hieran schutzsuchenden ungelöschten Kalk genug zu sättigen."

Ähnliche Mörtel mit Zusatz von Luftkalk in ungelöschtem, aber fein gepulvertem Zustande sind von Rob. Smicke in England und Dr. Artus hergestellt und empfohlen. Letzterer hat mit Mörtel aus 1 Tl. gut gelöschtem Kalk und 3 Tl. Sand, dem nach dem Mischen unmittelbar vor dem Gebrauch $^{3}/_{4}$ Tl. ganz fein zerteilter, ungelöschter Kalk zugesetzt war, gearbeitet. Die Cramerschen Patente bedeuten somit keine vollständigen Neuerungen, sondern sind im wesentlichen Nachahmungen der früheren Mörtel[3]).

Die damaligen Mörtel haben jedoch, soweit bekannt, keine ausgedehnte technische Verwendung gefunden, wahrscheinlich weil sie in ihrem Verhalten (das je nach der Art des Kalkes, dem Brande, der Mehlfeinheit usw. sich änderte) unzuverlässig waren und vermutlich Treiberscheinungen zeigten. — Trotzdem Luftkalke oder Luftkalkmörtel, wie aus vorstehendem ersichtlich, beim Anmachen mit Wasser unter Umständen zu einem „hydraulischen" Verhalten gezwungen werden können, wird man doch nicht von hydraulischer Erhärtung im eigentlichen Sinne bei solchem Kalk und Mörtel sprechen können. Kalke nehmen nach vorangegangener vollkommener Ablöschung, bei der sie bekanntlich 32,1 % Wasser (auf 56 Teile CaO kommen 18 Teile H_2O) chemisch binden, kein Wasser mehr chemisch auf, sind daher auch nicht imstande, „hydraulisch" zu erhärten. Dagegen haben Versuche gezeigt, daß Kalkmörtel sich bei zeitweiliger Gegenwart von Wasser anders verhält, als solcher, der nicht mit Wasser in Berührung kommt.

Einfluß zeitweiser Wasserbenetzung auf die Erhärtung (Festigkeit) von Mörtel aus Luftkalk. Bei Gelegenheit von Versuchen mit Mörteln aus hydraulischem Kalk, die über den Einfluß abwechselnder Anfeuchtung und Austrocknung auf die Erhärtung solcher Mörtel Aufschluß geben sollten und die auch auf Mörtel aus Luftkalk ausgedehnt wurden, ergab sich die auffällige Tatsache, daß auch diese Mörtel bei zeitweiser Benetzung, ebenso wie

[1]) Tonindustrie-Zeitung 1901. Nr. 138. S. 2052.

[2]) Gottgetreu, Physische und chemische Beschaffenheit der Baumaterialien. 1881. 2. Bd. S. 274 u. 276.

[3]) Ein Verfahren, wassererhärtenden Bindestoff durch Zusatz von ungelöschtem Kalk (in Pulverform) zu erzeugen, ist von Dr. Berkhoff ersonnen worden. Nach diesem durch Patent (D. R.-P. 125803) geschützten Verfahren ist das wassererhärtende (nicht treibende) Bindemittel ein Gemenge aus Kalziumoxyd (ungelöschter Kalk), Kalkhydrat und gebranntem Gips.

die Wassermörtel, höhere Festigkeit erzielten, als nicht benetzte. Die Ergebnisse dieser Versuche (Vorproben) sind in Tab. 46 enthalten. Wie ersichtlich, haben die zeitweise angenäßten Proben, namentlich die Druckprobekörper, mehr an Festigkeit zugenommen, als die nicht angefeuchteten. Diese Beobachtung, die anfänglich — und wohl auch mit gewisser Berechtigung — den Gedanken aufkommen ließ, daß im Kalkmörtel hydraulische Erhärtung stattgefunden habe, schien von außerordentlicher Tragweite und bemerkenswert genug, weiter verfolgt zu werden, und es wurden daher umfangreiche Versuche angeordnet, um den Einfluß zeitweiliger Wasserbenetzung auf die Erhärtung von Luftkalk bezw. Luftkalkmörtel planmäßig zu erforschen und wenn möglich die Ursachen der beobachteten Erscheinung klarzustellen.

Tab. 46. **Einfluß der Wasserbenetzung auf die Festigkeit von Kalkmörtel**[1].

(Vorversuch.)

(Kalkmörtel von einem Berliner Mörtelwerk.)

Versuch	Zugfestigkeit in kg/qcm nach			Druckfestigkeit in kg/qcm nach			Bemerkungen
	7 Tagen	28 Tagen	3 Monaten	7 Tagen	28 Tagen	3 Monaten	
Nr.	Erhärtung an der Luft						
1	4,0	5,4	6,3	10,1	13,0	18,4	
2	4,1	6,2	6,3	8,3	13,7	18,0	
3	4,3	5,5	6,4	9,0	13,2	22,0	
4	4,0	5,8	7,3	9,0	12,3	17,4	
5	3,3	5,4	6,0	10,0	12,8	17,2	Der Mörtel wurde in erdfeuchtem Zustande auf dem Hammerapparat in die Formen eingeschlagen.
Mittel	**3,9**	**5,7**	**6,5**	**9,3**	**13,0**	**18,6**	
Nr.	Alle 7 Tage 1 Stunde unter Wasser gesetzt						
1	—	—	8,6	—	—	24,0	
2	—	—	8,1	—	—	23,6	
3	—	—	7,1	—	—	22,8	
4	—	—	9,2	—	—	24,2	
5	—	—	6,2	—	—	23,2	
Mittel	—	—	**7,8**	—	—	**23,7**	

Versuchsreihe 1.

Aus Kalkteig, der nach verschiedenem Löschverfahren aus Luftkalk gewonnen war, und reinem[2]) Mauersand wurden im Verhältnis 1 : 3 nach Gewichtsteilen Zug- und Druckprobekörper normengemäß hergestellt. Der Kalk stammte nachweislich aus einem Kalkwerke, das nur Luftkalk erzeugt; der Mauersand enthielt keine in Salzsäure löslichen Bestandteile, die etwa hätten hydraulisch wirken können, so daß selbständige, auf Wasserbindung oder auf Wechselwirkung zwischen Kalk und Kieselsäure beruhende (hydraulische) Erhärtung des Kalkes ausgeschlossen war. Sämtliche Probekörper lagerten im Zimmer an der Luft; die halbe Anzahl der Probekörper wurde jedoch alle sieben Tage etwa eine Viertelstunde lang unter

[1]) Die Prüfung des Mörtels auf mechanische Zusammensetzung ergab das Mischungsverhältnis nach Gewichtsteilen = 1 : 5,1,
„ Raumteilen = 1 : 1,4.

[2]) Rein insofern, als der Sand keine in Säure löslichen, etwa hydraulisch wirkenden Bestandteile (lösliche Kieselsäure) enthielt.

Wasser getaucht. Die Prüfung bei 28 Tagen, 90 Tagen und 1 Jahr Alter der Proben lieferte die in Tab. 47 verzeichneten mittleren Festigkeitswerte.

Aus dem Vergleich der Ergebnisse der nur an der Luft erhärteten Körper mit denen der zeitweise in Wasser eingetauchten ist ohne weiteres der günstige Einfluß der Wasserbenetzung ersichtlich.

Tab. 47. Ergebnisse der Festigkeitsprüfungen.

Versuchsreihe 1 (Hannöverscher Kalk).

Mittelwerte aus je fünf Einzelversuchen.

Mörtelmischung (Gewichtsteile) Art des Ablöschens	Art der Erhärtung	1 Kalkteig + 3 Mauersand					
		Zugfestigkeit in kg/qcm nach			Druckfestigkeit in kg/qcm nach		
		28 Tagen	3 Monaten	1 Jahr	28 Tagen	3 Monaten	1 Jahr
Mittelwerte aus je fünf Einzelversuchen.							
Zusetzen des Ablöschwassers in Teilmengen und unter beständigem Rühren beim Ablöschen (a)	An der Luft	5,0	5,4	5,5	22,2	29,2	28,1
	Teilweise angefeuchtet [1])	7,9	9,2	9,5	24,4	37,0	35,1
Zusetzen des gesamten Ablöschwassers auf einmal ohne Rühren beim Ablöschen (b)	An der Luft	4,7	4,4	5,1	21,8	25,2	26,0
	Teilweise angefeuchtet [1])	8,5	8,1	10,4	23,6	34,1	35,3
Ablöschung nach Vorschlag Martens (c)	An der Luft	5,6	5,8	5,3	25,8	30,2	32,1
	Teilweise angefeuchtet [1])	9,5	9,5	13,2	26,4	39,2	45,5
Verhältniszahlen; Festigkeit der Luftproben = 100.							
a	Zeitweise angefeuchtet	158	170	173	110	127	125
b	Zeitweise angefeuchtet	181	184	204	109	135	136
c	Zeitweise angefeuchtet	170	164	249	102	130	142

[1]) Die Probekörper befanden sich bei der Prüfung im lufttrockenen Zustande.

Sowohl die Zug- wie die Druckproben, die zeitweise angenäßt waren, zeigen höhere Festigkeiten als die Luftproben (siehe auch Fig. 28).

Als beiläufiges recht auffälliges Ergebnis ist zu verzeichnen, daß der Mörtel aus nach Vorschlag Martens, d. h. mit beträchtlichem Überschuß an Wasser abgelöschten Kalkteig durchweg günstigere Werte lieferte, als die nach den anderen angewendeten Verfahren, also mit wenig Wasser, abgelöschten.

Der Grad der durch die Benetzung verursachten Festigkeitssteigerung ist übersichtlich durch die Verhältniszahlen in Tab. 47 veranschaulicht.

Vorstehender Prüfungsbefund bestätigte also nicht nur das Ergebnis der Vorversuche, sondern zeigte noch deutlicher den Einfluß der Wasserbenetzung auf den Erhärtungsfortschritt.

Eine zweite planmäßige Versuchsreihe sollte weiteren Aufschluß und insbesondere darüber Aufklärung geben, ob etwaige durch die Benetzung bewirkte erhöhte Kohlensäureaufnahme die Ursache der beobachteten Festigkeitsverbesserung sei.

Versuchsreihe 2.

Aus Kalkteig, gewonnen aus Rüdersdorfer Fettkalk, und Normalsand wurde im Verhältnis 1:3 nach Raumteilen Mörtel bereitet und aus diesem wurden Zug- und Druckprobekörper normengemäß hergestellt. Die Verwendung von nachweislich reinem Fettkalk[1]) und Normalsand, d. h. reinem Quarzsand ohne lösliche Kieselsäure, bot Gewähr dafür, daß keine etwaige auf Kalkhydrosilikatbildung beruhende, also hydraulische Erhärtung stattfinden konnte.

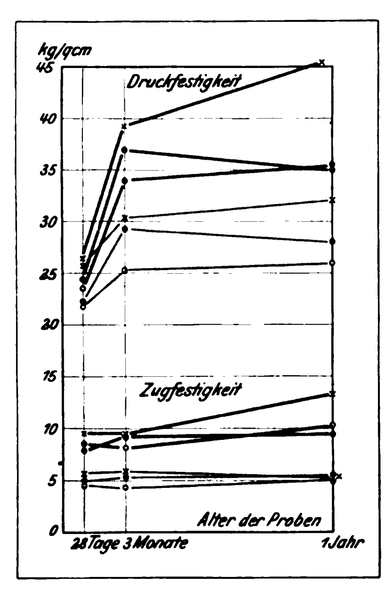


Fig. 28.
Festigkeit der Mörtel nach Tab. 47.
——— Erhärtung an der Luft.
▬▬▬ Zeitweise Wasserbenetzung.
• Ablöschen unter Zusetzen des Wassers in Teilmengen. o Ablöschen unter Zusetzen des gesamten Wassers. × Ablöschen nach Vorschlag Martens.

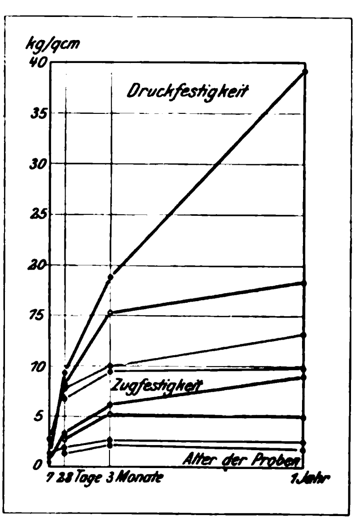


Fig. 29.
Festigkeit der Mörtel nach Tab. 48 und 51.
——— Erhärtung an der Luft.
▬▬▬ Zeitweise Wasserbenetzung.
• Versuchsreihe 2.
o „ 3.

Die halbe Anzahl der gefertigten Probekörper lagerte im Zimmer an der Luft; die übrigen Proben erhärteten ebenfalls im Zimmer an der Luft, wurden jedoch vom 7. bis zum 28. Tage alle 3 Tage, und von da ab alle 8 Tage etwa 15 Minuten lang unter Wasser gesetzt. Das vor den jeweiligen Prüfungsterminen stattfindende letztmalige Eintauchen unter Wasser erfolgte, abgesehen von den 7 Tagsproben, etwa 14 Tage vor der Prüfung, so daß sich die Proben bei der Prüfung, ebenso wie die Luftproben, im lufttrockenen Zustande befanden[2]).

[1]) Der gewöhnlich in Rüdersdorfer Fettkalk vorhandene geringe Gehalt an löslicher Kieselsäure kann für hydraulische Erhärtung nicht in Frage kommen. Wie der spätere Prüfungsbefund ergab, enthielt der Mörtel bei 1 Jahr Alter die kaum nennenswerte Menge von 0,12% löslicher Kieselsäure.

[2]) Durch besondere Versuche (Reihe 3) wurde später festgestellt, daß die Zugproben etwa 7 Tage und die Druckproben etwa 14 Tage brauchten, um den Zustand der Gewichtsgleichheit zu erreichen (s. S. 93).

Die Prüfung auf Festigkeit erfolgte bei 7, 28 Tagen, 3 Monaten und 1 Jahre Alter der Körper. Neben der Festigkeit wurde bei jeder Altersstufe der Gehalt der Proben an Kohlensäure bestimmt, und zwar sowohl an Mörtelmaterial, das vom Rande, als auch an solchem, das aus der Mitte der Druckproben entnommen war. Ferner wurde der Kohlensäuregehalt des Mörtels im frischen Zustande und der Gehalt der 1 Jahr alten Proben an löslicher Kieselsäure ermittelt.

Der mittlere Kohlensäuregehalt des frischen Mörtels betrug 0,1 %, der Gehalt an löslicher Kieselsäure bei 1 Jahr Alter 0,12 %. Dieser geringe Gehalt löslicher Kieselsäure rührt von dem Kalk selbst her (der Sand — Normalsand — enthielt keine lösliche Kieselsäure) und beweist nebenbei, daß irgend welche Einwirkung des Kalkes auf den Quarzsand nicht stattgefunden hatte.

Die Ergebnisse der Festigkeitsversuche und der Bestimmung des Kohlensäuregehaltes sind aus Tab. 48 und 49 ersichtlich, die ersteren außerdem in Fig. 29

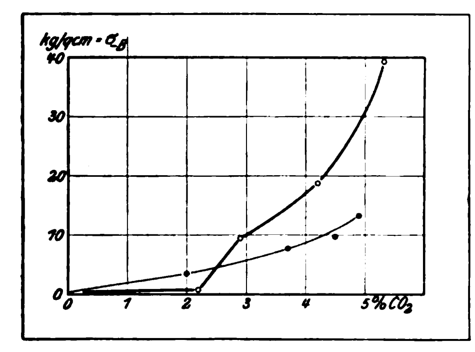


Fig. 30.
Druckfestigkeit und Kohlensäureaufnahme nach Tab. 48 und 49.
(Material vom Rande.)
Zeichenerklärung wie in Fig. 29.

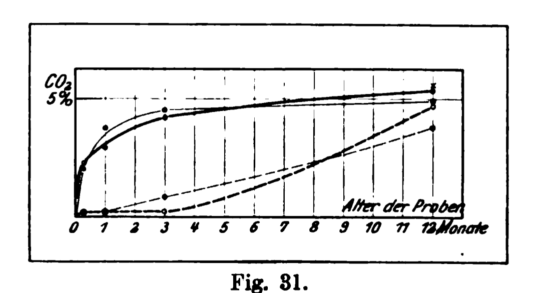


Fig. 31.
Kohlensäureaufnahme und Alter des Mörtels nach Tab. 49.
—— Erhärtung an der Luft. —— Zeitweise Wasserbenetzung. ---- Material vom Rande. ····· Material aus der Mitte.

zeichnerisch dargestellt. Das Verhältnis von Festigkeit zu Kohlensäuregehalt und die Beziehungen zwischen Kohlensäureaufnahme und Alter des Mörtels gehen aus Fig. 30 und 31 hervor.

> Die Ergebnisse der Festigkeitsprüfung bestätigen wiederum den Befund der voraufgegangenen Versuche, nur mit dem Unterschied, daß der Einfluß der Wasserbenetzung im vorliegenden Falle noch mehr zum Ausdruck gebracht wurde, wie namentlich aus den Verhältniszahlen (Tab. 48) hervorgeht.

So beträgt z. B. die Zugfestigkeit der 1 Jahr alten zeitweilig benetzten Proben 360 v. H., ihre Druckfestigkeit 298 v. H. der unbenetzt gebliebenen Proben. Nach dem Verlauf der Schaulinien (Fig. 29) ist auch noch erhebliche Steigerung der Festigkeit der erstgenannten Proben gegenüber den Luftproben zu erwarten.

> Das Ergebnis der Bestimmung des Kohlensäuregehalts der verschieden behandelten Proben bestätigte zunächst jedoch nicht zweifelsfrei die Annahme, daß durch die Wasserbenetzung etwa die Kohlensäureaufnahme gesteigert wurde; denn aus den gewonnenen Zahlen geht hervor, daß

die zeitweise benetzten Proben durchschnittlich nicht wesentlich mehr Kohlensäure aufgenommen hatten, als die Luftproben; erst bei 1 Jahr Alter weist erstere Art Proben höheren Kohlensäuregehalt auf als letztere.

Tab. 48. **Ergebnisse der Festigkeitsversuche.**

Versuchsreihe 2.

(Rüdersdorfer Kalk.)

Mittelwerte aus je fünf Einzelversuchen.

Mörtelmischung (Raumteile)	1 Kalkteig + 3 Normalsand								
Art der Erhärtung	Zugfestigkeit in kg/qcm nach				Druckfestigkeit in kg/qcm nach				Bemerkungen
	7 Tagen	28 Tagen	3 Monaten	1 Jahr	7 Tagen	28 Tagen	3 Monaten	1 Jahr	
An der Luft im Zimmer	1,2	1,9	2,6	2,5	2,7	7,8	9,9	13,2	1 l Kalkteig: 1,304 kg 1 l Normalsand $R_f = 1,402$ kg $R_r = 1,680$ kg $\frac{R_f + R_r}{2} = 1,542$ kg
An der Luft im Zimmer; vom 7.—28. Tage alle 3 Tage und von da ab alle 8 Tage 15 Min. lang unter Wasser getaucht	0,5 [1]	4,3	6,1	9,0 [2]	0,8 [1]	9,3	18,7	39,1 [2]	
Verhältniszahlen; Festigkeit der nicht in Wasser eingetauchten Proben = 100									
Zeitweise in Wasser getaucht	42	226	235	360	30	118	189	298	

[1]) Die Körper waren erst 5 Stunden vor der Prüfung unter Wasser getaucht und infolge des noch in ihnen enthaltenen Wassers wenig widerstandsfähig; einige Zugproben zerbröckelten beim Einspannen in den Prüfungsapparat.

[2]) Die letzte Eintauchung der Jahresproben erfolgte 5 Tage vor dem Prüfungstermin; die Proben lagerten dann im Freien bei zeitweiser Sonnenbestrahlung. Wie spätere Versuche ergeben haben, trockneten die Proben an der Luft verhältnismäßig langsam aus, und zwar die Zugproben erst in etwa 7, die Druckproben erst in etwa 14 Tagen.

Tab. 49. **Kohlensäuregehalt des Kalkmörtels.**

(Ermittelt an Würfeln.)

Mittelwerte aus je zwei Einzelversuchen.

Art der Erhärtung	Probematerial entnommen	Gehalt an Kohlensäure in % nach [3])				Bemerkungen
		7 Tagen	28 Tagen	3 Monaten	1 Jahr [4])	
An der Luft im Zimmer	vom Rande	2,0	3,7	4,5	4,9	Der mittlere Kohlensäuregehalt, ermittelt an je 1 Jahr alten Zugproben beider Erhärtungsarten, ergab sich für unbenetzte Proben zu 5,4%, und für zeitweise benetzte Proben zu 5,5%.
	aus der Mitte	0,2	0,2	0,8	3,7	
An der Luft im Zimmer; zeitweise in Wasser getaucht	vom Rande	2,2	2,9	4,2	5,3	
	aus der Mitte	0,2	0,2	(0,2)	4,7	

[3]) Der Kohlensäuregehalt des frischen Mörtels betrug im Mittel aus zwei Versuchen: 0,1%.

[4]) Der Gehalt der 1 Jahr alten Proben an löslicher Kieselsäure betrug: 0,12%.

Der Kohlensäuregehalt wurde ferner auch an je einer Zugprobe beider Erhärtungsarten (bei 1 Jahr Alter) ermittelt, nachdem zuvor jede Probe für sich zerkleinert, das zerkleinerte Material gut durchgemischt und eine zuverlässige Durchschnittsprobe genommen war.

Die Prüfung ergab im Mittel für die

trocken gelagerten Proben 5,4 % Kohlensäure,
zeitweise angefeuchteten Proben 5,5 % Kohlensäure.

Der Mörtel hätte bis zur vollen Sättigung rund 7,0 % Kohlensäure aufnehmen können [1]).

Versuchsreihe 3.

Zur weiteren Aufklärung wurde noch eine dritte Versuchsreihe ausgeführt, die sich auf Mörtel aus 1 Raumteil Kalkteig + 3 Raumteilen Normalsand erstreckte. Der verwendete Kalk war nach der Analyse guter Fettkalk (97,19 % Ätzkalk). Aus dem Mörtel wurden Zug- und Druckprobekörper in der üblichen Weise gefertigt und bei den vorgesehenen Altersstufen auf Gewicht, Festigkeit und Kohlensäuregehalt geprüft. Die Hälfte der Proben wurde ebenso behandelt wie bei Reihe 2; sie wurden bis zu 28 Tagen Alter einmal jede Woche eine Minute und von da ab allwöchentlich eine Stunde lang in Wasser getaucht.

Durch besondere Versuche wurde festgestellt, daß die Zugproben in 7 Tagen und die Druckproben in 14 Tagen den Zustand der Lufttrockenheit erreichten. (Vgl. Tab. 49a.)

Tab. 49a. Gewichtsveränderung in Wasser getauchter Kalkmörtelproben bei Lagerung an der Luft.

Mittelwerte aus je fünf Einzelversuchen.

Art der Proben	Gewicht der Proben in g									
	nach dem Eintauchen in Wasser	nach Tagen Lagerung an der Luft								
		1	2	3	5	7	8	10	12	14
Zugproben	148	142	139	138	137	137	—	—	—	—
Druckproben	737	723	710	698	687	682	680	679	677	677

Die Ergebnisse der übrigen Prüfungen dieser Reihe sind in den Tab. 50—52 verzeichnet.

Tab. 50. Analyse des Kalkes (bezogen auf den kohlensäure- und wasserfreien Zustand).

Versuchsreihe 3 (Kalk aus Mähren).

Kieselsäure und Unlösliches	0,78 %
Eisenoxyd und Tonerde	0,56 „
Ätzkalk	97,19 „
Magnesia	0,76 „
Rest (Alkalien usw.)	0,71 „

[1]) 74 Teile $Ca(OH)_2$ nehmen 44 Teile (59,5 %) CO_2 auf, geben hierbei jedoch 18 Teile (24,3 %) H_2O ab; die Gewichtszunahme beträgt also 35,2 %.



Tab. 51. Raumgewichte und Festigkeiten.

Mittelwerte aus je fünf Einzelversuchen.

Mörtelmischung (Raumteile)	1 Kalkteig + 3 Normalsand (7,5 % Wasser)								
Art der Erhärtung	Zugproben				Druckproben				Bemerkungen
	3 Tage	28 Tage	1 Monat	1 Jahr	3 Tage	28 Tage	1 Monat	1 Jahr	
Raumgewicht g/ccm.									Sämtliche Proben lagerten an der Luft. Die zeitweise anzufeuchtenden Proben wurden bis zum 28. Tage alle 8 Tage etwa eine Minute und von da ab alle 8 Tage eine Stunde in Wasser getaucht. Die feuchten Proben brauchten etwa 14 Tage, um auszutrocknen, d. h. Gewichtsgleichheit zu erreichen.
An der Luft	1,871	1,886	1,900	1,900	1,901	1,825	1,839	1,845	
An der Luft, zeitweise angefeuchtet	1,886	1,914	1,943	1,943	1,899	1,837	1,851	1,862	
Festigkeit kg/qcm.									
An der Luft	—	1,3	2,2	1,8	—	6,7	9,1	9,9	
An der Luft, zeitweise angefeuchtet	—	2,7	5,1	5,0	—	8,2	15,2	17,6	
Verhältniszahlen; Festigkeit der nicht benetzten Proben = 100.									
Zeitweise angefeuchtet	—	208	232	278	—	125	167	178	

Tab. 52. Kohlensäuregehalt der Proben zu Tab. 51.

(An Würfeln ermittelt.)

Art der Erhärtung	Alter der Proben	28 Tage		3 Monate		6 Monate		1 Jahr	
	Entnahmestelle	Vom Rande	Aus der Mitte	Vom Rande	In der Mitte	Vom Rande	In der Mitte	Vom Rande	In der Mitte
	Versuch-Nr.	Kohlensäuregehalt %							
An der Luft	1	3,35	1,23	3,81	1,21	3,83	0,80	3,84	3,53
	2	3,31	1,18	3,74	1,01	3,71	0,70	3,76	3,57
	Mittel	**3,33**	**1,21**	**3,78**	**1,11**	**3,77**	**0,75**	**3,80**	**3,55**
Zeitweise angefeuchtet	1	4,94	0,78	6,32	0,44	6,84	2,38	6,92	4,72
	2	5,18	0,69	6,82	0,37	6,00	2,30	6,83	4,66
	Mittel	**5,06**	**0,74**	**6,57**	**0,41**	**6,42**	**2,34**	**6,88**	**4,69**

Die Festigkeitswerte sind in Fig. 29 zeichnerisch dargestellt, ferner sind die Beziehungen zwischen Raumgewicht und Festigkeit, zwischen Raumgewicht und

Kohlensäuregehalt, zwischen Festigkeit und Kohlensäuregehalt, sowie zwischen Kohlensäureaufnahme und Alter durch Fig. 32—35 veranschaulicht.

Aus den Ziffern und dem Verlauf der Schaulinien läßt sich schließen:

1. das Raumgewicht der benetzten Proben nimmt mit fortschreitendem Alter mehr zu, als das der nicht benetzten,
2. die Festigkeit der angefeuchteten Proben ist höher, als die der nicht angefeuchteten; der Unterschied nimmt innerhalb der beobachteten Zeitgrenzen mit dem Alter zu,
3. die benetzten Proben nehmen mehr Kohlensäure auf, als die nicht benetzten.

Also auch das Ergebnis dieser Reihe läßt den auffallend günstigen Einfluß der Wasserbenetzung auf die Erhärtung der Kalkmörtel aufs deutlichste erkennen, liefert aber ferner die volle Bestätigung dafür, daß die Ursache dieses Einflusses tatsächlich die infolge des abwechselnden Anfeuchtens und Austrocknens gesteigerte Kohlensäureaufnahme, bezw. die hierdurch bewirkte schnellere Umwandlung größerer Mengen] Ätzkalk in kohlensauren Kalk ist.

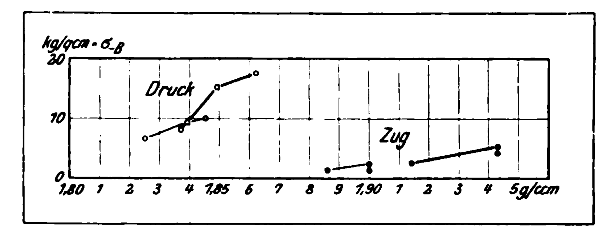


Fig. 32.
Raumgewicht und Festigkeit nach Tab. 51.
Zeichendeutung wie in Fig. 29.

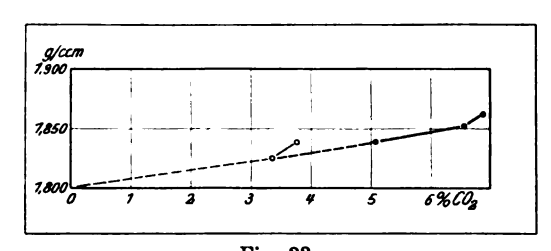


Fig. 33.
Raumgewicht und Kohlensäuregehalt nach Tab. 51 und 52.
Zeichendeutung wie in Fig. 29.

Die Benetzung des Mörtels bewirkt wahrscheinlich Ausscheidung von Kalk durch Umlösung, die größere Verdichtung und Verkittung der Mörtelmasse zur Folge hat. Durch das jedesmalige Befeuchten wird immer wieder Kalk gelöst, ausgeschieden, in kohlensauren Kalk übergeführt und so die Festigkeit des Mörtels gesteigert.

Auf die gleichartige Erscheinung bei hydraulischen Kalken und Zementen habe ich oben bereits verwiesen. Auch hierbei erklärt sich nach den vorstehenden Untersuchungen die durch abwechselndes Anfeuchten und Austrocknen herbeigeführte Festigkeitssteigerung als eine Folge der durch die Anfeuchtung veranlaßten Herauslösung von Ätzkalk und dessen Umwandlung in kohlensauren Kalk.

Eine andere Fage ist, ob nicht außer der erhöhten Kohlensäureaufnahme vielleicht noch andere Vorgänge sich abspielen, die den günstigen Erhärtungsverlauf und die damit verbundene Festigkeitszunahme der Luftkalkmörtel beim Anfeuchten bewirken. — Wie dem jedoch auch sei, jedenfalls sind die Ergebnisse der vorbeschriebenen Versuche bemerkenswert genug, um allgemeine und eingehendste Beachtung zu finden; denn sie beweisen einwand- und zweifelsfrei, daß Kalkmörtel

nur dann wirksam erhärtet und die ihm nachgerühmte Steinhärte nur annimmt, wenn er, wie dies nur bei Bauten, die allen Witterungseinflüssen ausgesetzt sind, der Fall ist, Gelegenheit hat, zeitweise Wasser aufzunehmen und wieder auszutrocknen [1]). So finden wir bei alten Bauwerken (Ruinen usw.), die in Luftkalkmörtel aufgemauert sind, diesen dort am besten erhärtet und am festesten, wo er der Einwirkung der Witterungseinflüsse am ungehindertsten ausgesetzt ist.

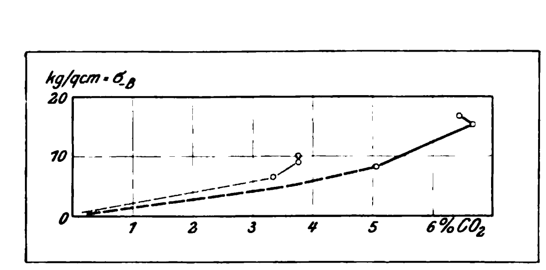


Fig. 34.
Druckfestigkeit und Kohlensäuregehalt (Material vom Rande) nach Tab. 51 und 52.
Zeichendeutung wie in Fig. 29.

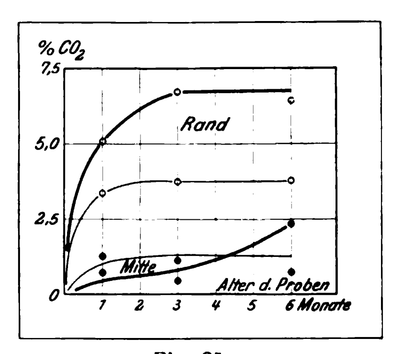


Fig. 35.
Kohlensäuregehalt und Alter nach Tab. 52.
Zeichendeutung wie in Fig. 29.

In der neuesten Zeit im Amt ausgeführte Untersuchungen alter Mörtel, die aus den Ruinen der Hohkönigsburg stammen, bestätigen in interessanter Weise diese Anschauung und gleichzeitig den durch den Versuch nachgewiesenen Einfluß der Feuchtigkeitszufuhr auf die Festigkeit der Luftmörtel. Nach dem Analysenbefund bestanden diese alten Mörtel aus Luftkalk und Bausand. Letzterer erwies sich als ein feinkörniger, teils fein- bis mittelkörniger grauer bis rötlichgrauer Kalksand, mit vereinzelten gröberen Trümmern von feinkörnigem rotem Sandstein vermischt.

> Im übrigen ergab die Prüfung, daß die mehr der Witterung ausgesetzt gewesenen Mörtel fester und härter waren, als die den geschützten inneren Stellen (Innenputz, Innenfugen usw.) des Mauerwerks entnommenen; auch war der Mörtel an der Oberfläche steiniger erhärtet, als an der inneren Haftfläche, nach der derselbe meistens weicher und mürber wurde, namentlich bei den dickeren Mörtelstücken.

Erhärtung von reinem Kalkhydrat bei zeitweiser Wasserbenetzung. Um festzustellen, wie sich das reine Kalkhydrat, d. h. der Mörtel ohne Sandzusatz, bei zeitweiser Anfeuchtung verhält, wurden folgende Versuche ausgeführt.

Versuchsreihe 1.

Aus reinem Kalkhydrat (in Pulverform) wurden Zugkörper durch Einschlagen auf dem Hammerapparat hergestellt. Hierzu war das Kalkpulver mit so viel Wasser angemacht, daß die Masse erdfeucht wurde; Druckproben konnten noch nicht gefertigt werden, weil beim Beginn der Versuche das Verfahren, brauchbare

[1]) Diese Bedingungen werden unter gewöhnlichen Verhältnissen meist nicht erfüllt. Die Bauten werden möglichst schnell ausgetrocknet, die Mauern werden verputzt, die Wände tapeziert usw.

Mörtel aus reinem Kalk anzufertigen, noch nicht ausgebildet war. Zwei Kalksorten gelangten zur Verwendung, die eine war Kalk aus einem Werke, das nachweislich guten Fettkalk erzeugt, die andere war von einem Berliner Mörtelwerk als Fettkalk bezogen.

Sämtliche Probekörper lagerten an der Luft im Zimmer, die halbe Anzahl wurde alle fünf Tage mit Wasser angefeuchtet und vor jedem Prüfungstermine zwei Tage lang in einem Trockenschrank getrocknet und einen Tag an der Luft gelagert. Künstliches Trocknen mußte angewendet werden, weil die Körper nur sehr langsam das Wasser bei der Lagerung an der Luft abgaben, bei der Prüfung aber den gleichen Feuchtigkeits- bezw. Trockenzustand haben sollten, wie die unbenetzt gebliebenen Proben.

Aus den Ergebnissen der Prüfung (Tab. 53) geht hervor, daß im vorliegenden Falle die Wasserbenetzung ohne jeglichen Einfluß auf die Erhärtungsfähigkeit der Kalke geblieben ist. Die Proben beider Erhärtungsarten erlangten nahezu gleiche Festigkeiten, und zwar übereinstimmend bei beiden Kalken.

Einfluß zeitweiser Wasserbenetzung auf die Erhärtung von reinem Kalkhydrat aus Luftkalk.

Tab. 53. Zugfestigkeit von erdfeucht eingeschlagenen Proben aus Kalkhydratpulver.

Mittelwerte aus je fünf Einzelversuchen.

Kalksorte	Harzer Kalk[1])			Fettkalk, bezogen von einem Berliner Mörtelwerk[2])			Bemerkungen
Art der Erhärtung	Zugfestigkeit in kg/qcm nach						
	14 Tagen	28 Tagen	3 Monaten	14 Tagen	28 Tagen	3 Monaten	
An der Luft	2,1	2,3	2,3	2,0	2,6	4,6	Die angefeuchteten Proben wurden vor jedem Prüfungstermin 2 Tage lang getrocknet (im Trockenofen) und 1 Tag an der Luft gelagert.
An der Luft, alle fünf Tage stark angefeuchtet	1,7	2,5	3,7	1,8	2,1	4,6	

Versuchsreihe 2.

Da nicht ausgeschlossen war, daß die Unzuverlässigkeit des Zugversuchs das Ergebnis in irgend einer Weise beeinflußt haben konnte, wurde, da inzwischen auch das Verfahren, Druckprobekörper aus reinem Kalk herzustellen, vervollkommnet war, eine zweite Versuchsreihe angeordnet, bei der gleichzeitig Zug- und Druckversuche ausgeführt werden sollten. Hierzu wurde Kalk aus einem Kalkwerke in Schlesien verwendet (86 % Ätzkalk). Das aus dem Kalk gewonnene Kalkpulver wurde auf dem 120-Maschensieb abgesiebt und das abgesiebte Pulver unter Verwendung von 47 % Wasser erdfeucht verarbeitet. Aus dieser erdfeuchten Masse wurden Zug- und Druckprobekörper von Hand in die Form eingeschlagen. Sämtliche Proben lagerten wie bei Reihe 1 an der Luft; jedoch wurden die für die Wasserbenetzung bestimmten Proben bis zu 6 Monaten Alter jede Woche und von da ab monatlich einmal eine Stunde unter Wasser getaucht.

[1]) 1 l Kalkpulver wog eingelaufen 0,412 kg, eingerüttelt 0,690 kg.
[2]) 1 l Kalkpulver wog eingelaufen 0,473 kg, eingerüttelt 0,776 kg.

Die Versuchsergebnisse sind in Tab. 54 und 55 verzeichnet.

Tab. 54. **Analyse des Kalkes (aus Schlesien).**

(Bezogen auf den kohlensäure- und wasserfreien Zustand.)

Kieselsäure und unaufgeschlossener Rückstand .	2,04 %
Eisenoxyd und Tonerde	2,09 „
Ätzkalk	86,52 „
Magnesia	6,93 „
Schwefelsäure	Spuren
Kohlensäure	9,42 „

(= 5,45 % kohlensaurer Kalk)

Sie bestätigen im wesentlichen den Prüfungsbefund der ersten Versuchsreihe, d. h. die bei zeitweiser Wasserbenetzung erhärteten Proben lieferten keine höhere Festigkeiten, als die an der Luft gelagerten; bei 28 Tagen und 3 Monaten Alter sogar wesentlich niedrigere, was wahrscheinlich darauf zurückzuführen ist, daß die Proben bei der Prüfung nicht vollständig lufttrocken waren und infolge der noch in ihnen enthaltenen Feuchtigkeit geringere mechanische Festigkeit hatten, als die trockenen Luftproben.

Einige Proben, die nebenbei angefertigt waren, wurden, nachdem sie 10 Tage an der Luft gelagert hatten, unter Wasser gesetzt und bei 28 Tagen und 3 Monaten Alter geprüft. Sie lieferten wesentlich geringere Werte, als die gleichalterigen an der Luft erhärteten Proben (Tab. 55), u. a. ein Beweis dafür, daß Kalkhydrat bei beständiger Lagerung unter Wasser (also hydraulisch) nicht zu erhärten imstande ist.

Tab. 55. **Festigkeit des reinen Kalkhydratpulvers.**

(Erdfeucht angemacht mit 47,0 % Wasser.)

Mittelwerte aus je fünf Einzelversuchen.

Art der Erhärtung	Zugfestigkeit in kg/qcm nach				Druckfestigkeit in kg/qcm nach				Verhältnis Zug : Druck für			
	28 Tagen	3 Monaten	6 Monaten	1 Jahr	28 Tagen	3 Monaten	6 Monaten	1 Jahr	28 Tagen	3 Monaten	6 Monaten	1 Jahr
An der Luft	4,8	6,8	4,0	7,4	12,2	18,5	24,5	32,4	$\frac{1}{2,5}$	$\frac{1}{2,7}$	$\frac{1}{6,0}$	$\frac{1}{4,4}$
An der Luft, zeitweise angefeuchtet [1])	2,4	2,2	6,0	8,5	6,3	11,7	18,8	33,6	$\frac{1}{2,7}$	$\frac{1}{5,3}$	$\frac{1}{3,0}$	$\frac{1}{4,0}$
10 Tage [2]) an der Luft, die übrige Zeit unter Wasser	1,6	1,6	—	—	4,4	4,1	—	—	$\frac{1}{2,8}$	$\frac{1}{2,6}$	—	—

Aus dem Verlauf der Schaulinien in Fig. 36, in der die Festigkeitswerte dargestellt sind, scheint hervorzugehen, daß die Erhärtung der angefeuchteten Proben bei höherem Alter energischer wird, als die der Luftproben.

1) Die Probekörper wurden bis zu 6 Monaten Alter jede Woche und von da ab jeden Monat einmal eine Stunde unter Wasser getaucht.

2) Die frühere Unterwassersetzung war nicht möglich, da die Proben sonst zerfielen.

Daß sich die reinen Kalkproben innerhalb der beobachteten Zeitdauer anders verhalten, als die Mörtelproben mit Sandzusatz, ist vielleicht darauf zurückzuführen, daß das reine Kalkhydrat zu wenig porös ist, namentlich da es durch das Einschlagen stark verdichtet ist, und daher die Kohlensäure nur schwer und nur sehr langsam aufnimmt. Das Benetzen bleibt infolgedessen ohne wesentlichen Einfluß auf die Erhärtung, insbesondere da der Kalk ohne Sand, ebenfalls infolge seiner geringen Luftdurchlässigkeit, die Feuchtigkeit außerordentlich schwer abgibt.

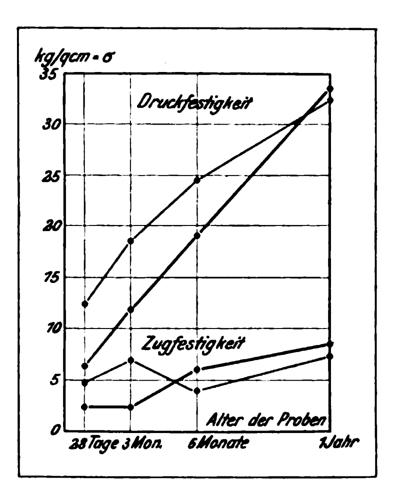


Fig. 36.
Festigkeit des reinen Kalkes (Kalkhydrat) nach Tab. 55.
Zeichendeutung wie in Fig. 29.

Man ersieht aber überdies aus diesen Versuchen wieder, wie wertvoll und nötig ein gewisser Sandzusatz zum Kalkmörtel ist.

Hiermit ist die Reihe der Umstände, die die Güte der Luftkalkmörtel beim Anmachen und deren Verhalten nach dem Vermauern, also bei der Erhärtung, beeinflussen können, im wesentlichen erschöpft. Es bliebe noch übrig, auf das Verhalten von Luftkalkmörtel bei Einwirkung von Frost (Frost- oder Wetterbeständigkeit) und Feuer (Feuerbeständigkeit) einzugehen. Es kann aber hiervon füglich Abstand genommen werden, da Kalkmörtel nach den vorliegenden, Jahrhunderte alten Erfahrungen genügende Widerstandsfähigkeit gegen Witterungseinflüsse und Feuerbeanspruchung aufweisen, soweit Anforderungen überhaupt nach dieser Richtung an sie gestellt werden.

II. Abschnitt.

Kalkmörtel und Mauerwerk in Kalkmörtel.

a) Die Festigkeitseigenschaften der Luftkalkmörtel.

Trotzdem der Luftkalk ein bereits seit langer Zeit verwendeter Bindemittelstoff ist, — nach Lehm ist er der älteste Stoff dieser Art — gibt es keine einheitlichen Vorschriften, die als Grundlage für die Prüfung der Luftkalke dienen könnten. Es gibt nicht einmal eine Norm für die Güte und Verwendbarkeit der Luftkalke und Luftkalkmörtel oder wenigstens eine maßgebende und allgemein anerkannte Bestimmung dafür, welches Mischungsverhältnis Kalkmörtel aus Luftkalk haben muß, um als gebrauchs- und genügend erhärtungsfähig zu gelten. Den einzigen Anhalt in dieser Beziehung bietet die von Dr. Ziureck[1]) auf Grund von Versuchen mit alten Mörteln aufgestellte Bestimmung:

„daß zur Herstellung eines dauerhaften und guten Kalkmörtels die Mörtelsubstanzen in solchen Mischungsverhältnissen zusammengesetzt sein sollen, daß der trockene Mörtel 13—15% Kalkhydrat enthält."

Auffallend wenig ist man über die Festigkeitseigenschaften des Luftkalkes und der Luftkalkmörtel unterrichtet, ein Mangel, der sich auch in der Fachliteratur allenthalben zeigt; denn die einschlägigen Handbücher enthalten keinerlei bestimmte Angaben über die Bindekraft genannter Mörtel und keine zahlenmäßigen Unterlagen für diese Eigenschaft, sondern höchstens ganz allgemein gehaltene Erklärungen, etwa dahin lautend, daß die Erhärtung mit der Zeit stetig, wenn auch langsam fortschreite und der Mörtel schließlich Steinhärte erlange.

Allgemein und selbst in Fachkreisen macht man sich daher unrichtige und zwar übertriebene Darstellungen von der Bindekraft (Festigkeit) des gewöhnlichen Mauermörtels.

Die ersten Versuche, die die Ermittelung der Festigkeit von Kalkmörtel zum Gegenstande haben, sind wohl die von Ziureck in den sechziger Jahren angestellten. Anlaß zu diesen Prüfungen, die zur Erlangung von Grundlagen für die Beurteilung der Widerstandsfähigkeit der damals üblichen Mörtelmischungen gegen Zerdrücken ausgeführt wurden, gab der Einsturz mehrerer Neubauten in Berlin. Insbesondere sollte hierbei Kalk- und Zementmörtel miteinander verglichen werden.

[1]) Ziureck, Abhandlung über Mörtel in baupolizeilicher, technischer und chemischer Beziehung. Zeitschr. f. Bauwesen 1861. S. 15.



Der genannte Forscher berichtet über das von ihm bei den Versuchen angewendete Verfahren in der Zeitschrift für Bauwesen (1861, S. 15) wie folgt:

„Von jedem Mörtel wurden drei gleich schwere (5 g), gleich große und gleich geformte Fragmente einzeln auf eine Glasplatte gelegt, mit einer gewöhnlichen Glasplatte bedeckt und diese solange steigend mit Gewichten von 3 g beschwert, bis das Fragment zerdrückt wurde. Von den Ergebnissen, die die drei Proben lieferten, wurde der Durchschnitt als maßgebend angenommen."

Das Ergebnis dieses Einzelversuchs drückt Ziureck durch das Vielfache der Probengewichte aus, das zum Zerdrücken des Versuchskörpers erforderlich war. Diese Gewichte schwankten, nebenbei bemerkt, zwischen 0,210 und 3,350 kg.

Da bestimmte Vorschriften für die Lieferung und Prüfung von Kalk nicht bestanden und, wie oben bereits bemerkt, auch jetzt noch nicht bestehen, sind die Untersuchungen der Kalke im Materialprüfungsamt bisher nicht völlig einheitlich behandelt, sondern nach ihrem jeweiligen Zweck in verschiedener Anordnung und mit voneinander abweichenden Mischungsverhältnissen der Mörtel ausgeführt worden.

Die erste Veröffentlichung der früheren Königlichen Prüfungsstation für Baumaterialprüfung (jetzigen Abt. 2 für Baumaterialprüfung im Materialprüfungsamt) über die Ergebnisse einer Prüfung, die sich nachweislich auf Luftkalk erstreckte, erfolgte im Jahre 1883 in den „Mitteilungen aus den Königlichen Technischen Versuchsanstalten". Die Versuche sind im Jahre 1882 ausgeführt worden. Der geprüfte Kalk war Gogoliner Weißkalk. Die gewonnenen Ergebnisse seien nachstehend (Tab. 56) verkürzt wiedergegeben.

Tab. 56. Ergebnisse der Festigkeitsversuche mit Mörtel aus Gogoliner Weißkalk und Normalsand.

Mittelwerte aus je 10 Einzelversuchen.

Mörtelmischung (Gewichtsteile)	Zugfestigkeit in kg/qcm nach		
	7 Tagen	28 Tagen	90 Tagen
1 Kalkpulver + 2 Normalsand	2,45	2,94	3,32
1 Kalkpulver + 3 Normalsand	1,48	3,08	3,34
1 Kalkpulver + 4 Normalsand	1,09	2,39	2,53

Die erste geordnete Zusammenstellung von Versuchsergebnissen einer größeren Reihe von Kalkuntersuchungen wurde von mir in den „Mitteilungen" Heft 4, Jahrg. 1894, veröffentlicht. Sie umfaßt sämtliche in den Jahren 1885—1894 geprüften Kalkarten (Luft-, Wasser- und Zementkalke). Aus dieser Zusammenstellung seien die Ergebnisse der Prüfungen von Luftkalken, bezw. von daraus hergestellten reinen Kalkmörteln (außer reinem Kalkmörtel wurden nämlich auch Kalkmörtel mit Traß- und Zementschlägen untersucht) herausgegriffen und nebst denjenigen der vom Jahre 1895 an bis in die neueste Zeit in der Abteilung für Baumaterialprüfung untersuchten Luftkalke in Tab. 57 zusammengefaßt[1]). An Hand dieser Versuchszahlen seien die Festigkeitseigenschaften der Luftkalke und Luftkalkmörtel innerhalb der zur Prüfung gelangten Altersgrenzen einer kurzen Betrachtung unterzogen.

[1]) Beigefügt sind in dieser Tabelle außer den im laufenden Betriebe gewonnenen Versuchswerten die Ergebnisse derjenigen Festigkeitsversuche, die im ersten Teil dieser Arbeit behandelt sind.



Festigkeitseigenschaften der Luftkalkmörtel.

Tab. 57. Ergebnisse der Prüfung von Luftkalkmörteln auf Zug- und Druckfestigkeit.

Mittelwerte aus je zehn oder fünf Einzelversuchen.

1	2	3	4				5				6
Nr. (Lfd. Nr. der Mitteilungen 1894)	Herkunft des Kalkes	Mörtelmischung	Zugfestigkeit in kg/qcm nach				Druckfestigkeit in kg/qcm nach				Bemerkungen
			7 Tagen	28 Tagen	60 Tagen	90 Tagen	7 Tagen	28 Tagen	60 Tagen	90 Tagen	
1 (4)	Westfalen	1 Raumtl. Kalkpulver + 1,5 „ Normalsand	—	2,74	4,82	—	—	16,5	21,2	—	Kalkpulver $R_f = 0,488$ kg „ $R_r = 0,781$ „
2 (4)	Bremen	1 Raumtl. Kalkpulver + 1,5 „ Normalsand	—	2,06	3,27	—	—	7,2	10,8	—	Kalkpulver $R_f = 0,571$ kg „ $R_r = 0,981$ „
3 (5)	Unbekannt	1 Raumtl. Kalkteig + 3 „ Normalsand	—	3,96	4,17	4,80	—	—	—	—	Kalkteig $R_r = 1,259$ kg
		1 Raumtl. Kalkteig + 3,5 „ Normalsand	—	2,53	2,83	3,30	—	—	—	—	
4 (15)	Westfalen	1 Raumtl. Kalkpulver + 1,5 „ Normalsand	1,24	1,99	—	—	5,8	10,0	—	—	Kalkpulver $R_f = 0,490$ kg „ $R_r = 0,755$ „
5 (17)	Rüdersdorf	1 Raumtl. Kalkpulver + 2 „ Normalsand	1,92	4,20	Anfertigung der Proben sofort nach dem Anmachen		5,3	7,6	Anfertigung der Proben sofort nach dem Anmachen		Kalkpulver $R_f = 0,465$ kg „ $R_r = 0,744$ „
			1,60	3,24	3 Stunden nach dem Anmachen		3,9	6,3	3 Stunden nach dem Anmachen		
			1,08	2,30	6 Stunden nach dem Anmachen		3,1	5,3	6 Stunden nach dem Anmachen		
			1,33	2,77	9 Stunden nach dem Anmachen		2,8	4,8	9 Stunden nach dem Anmachen		
6 (32)	Mecklenburg	1 Gewichtstl. Kalkpulver + 3 „ Normalsand	—	3,08	—	—	—	11,8	—	—	Kalkpulver $R_f = 0,402$ kg „ $R_r = 0,637$ „
7 (40)	Harz (Marmorkalk)	1 Raumtl. Kalkteig + 2 „ Normalsand	—	2,90	3,28	3,84	—	12,7	16,4	24,0	Kalkteig $R_r = 1,269$ kg
		1 Raumtl. Kalkteig + 3 „ Normalsand	—	1,93	2,35	2,81	—	9,9	12,0	16,4	
		1 Raumtl. Kalkteig + 4 „ Normalsand	—	1,16	1,62	1,84	—	6,4	10,0	13,7	
8 (42)	Unbekannt	1 Raumtl. Kalkpulver + 2 „ Normalsand	—	2,48	3,82	—	—	11,8	17,8	—	Kalkpulver $R_f = 0.400$ kg „ $R_r = 0,636$ „
		1 Raumtl. Kalkteig + 3 „ Normalsand	—	2,30	3,49	—	—	8,4	13,6	—	
9 (48)	Hecklingen i. Anhalt	1 Raumtl. Kalkpulver + 1 „ Normalsand	—	4,33	6,30	7,75	—	24,6	26,3	27,2	Kalkpulver $R_f = 0,436$ kg „ $R_r = 0,679$ „
		1 Raumtl. Kalkpulver + 2 „ Normalsand	—	3,51	3,91	5,10	—	14,2	14,5	17,5	
10	Sachsen	1 Raumtl. Kalkpulver + 2 „ Normalsand	—	1,40	—	2,24	—	5,5	—	15,5	Kalkteig $R_r = 1,426$ kg Kalkpulver $R_f = 0,879$ „ „ $R_r = 0,679$ „ Normalsand $R_f = 1,390$ „ „ $R_r = 1,683$ „ Bausand $R_f = 1,608$ „ „ $R_r = 1,911$ „
		1 Raumtl. Kalkpulver + 4 „ Bausand	—	2,19	—	3,83	—	3,7	—	7,6	
		1 Raumtl. Kalkteig + 6 „ Bausand	—	2,59	—	3,75	—	4,1	—	7,3	
11	Schlesien	1 Raumtl. Kalkpulver + 2 „ Normalsand	—	4,10	4,00	4,10	—	11,8	14,0	18,5	Kalkpulver $R_f = 0,508$ kg „ $R_r = 0,791$ „
		1 Raumtl. Kalkpulver + 3 „ Normalsand	—	2,43	3,20	2,87	—	6,8	8,4	10,2	

1	2	3	4				5				6
Nr. (Lfd. Nr. der Mitteilungen 1894)	Herkunft des Kalkes	Mörtelmischung	Zugfestigkeit in kg/qcm nach				Druckfestigkeit in kg/qcm nach				Bemerkungen
			7 Tagen	28 Tagen	60 Tagen	90 Tagen	7 Tagen	28 Tagen	60 Tagen	90 Tagen	
12	Schlesien	1 Raumtl. Kalkpulver + 1 „ Normalsand	—	3,08	4,92	6,13	—	7,8	10,1	12,2	Kalkpulver $R_f = 0{,}430$ kg „ $R_r = 0{,}745$ „
		1 Raumtl. Kalkpulver + 3 „ Normalsand	—	1,84	2,54	2,34	—	3,7	5,3	6,9	
13	Harz i. Thür.	1 Raumtl. Kalkteig + 2 „ Normalsand	—	3,09	2,80	3,16	—	7,1	6,8	7,2	Kalkteig $R_r = 1{,}272$ kg
		1 Raumtl. Kalkteig + 4 „ Normalsand	—	1,41	2,06	2,10	—	2,8	4,2	4,2	
14	Sauerland (Marmorkalk)	1 Raumtl. Kalkteig + 3 „ Normalsand	—	1,8	—	2,1	—	6,6	—	8,3	Kalkteig $R_r = 1{,}255$ kg Normalsand $R_f = 1{,}415$ „ „ $R_r = 1{,}695$ „
15	Westfalen	1 Raumtl. Kalkteig + 3 „ Normalsand	—	1,4	—	1,8	—	3,9	—	6,0	Kalkteig $R_r = 1{,}222$ kg Normalsand 1 l = 1,544 „ Mauersand 1 l = 1,686 „
		1 Raumtl. Kalkteig + 3 „ Mauersand	—	2,1	—	2,1	—	6,7	—	9,8	
16 (2|4303a)	Mähren Schönberg (Spielberg [1])	1 Raumtl. Kalkteig + 3 „ Normalsand	—	2,6	—	3,7	—	10,5	—	14,5	Kalkteig $R_r = 1{,}359$ kg Normalsand 1 l = 1,466 „
	Mähren Schönberg (Olbrich) [2]	1 Raumtl. Kalkteig + 3 „ Normalsand	—	2,9	—	3,4	—	9,4	—	13,3	Kalkteig $R_r = 1{,}335$ kg Normalsand 1 l = 1,466 „
	Mähren Schönberg (Lichtenstein) [3]	1 Raumtl. Kalkteig + 3 „ Normalsand	—	1,9	—	2,4	—	8,3	—	10,3	Kalkteig $R_r = 1{,}305$ kg Normalsand 1 l = 1,466 „
17	Harz	1 Gewichtst. Kalkteig + 4 „ Normalsand	—	—	—	—	8,0	10,7	—	13,7	Die Proben wurden aus erdfeuchtem Mörtel durch Einschlagen hergestellt.
			—	—	—	—	4,2	5,9	—	8,9	Die Proben wurden aus mauergerechtem Mörtel durch Einfüllen hergestellt.
18	Schlesien	1 Gewichtstl. Kalkteig + 3 „ Mauersand	—	—	—	—	17,1	23,5	—	34,0	Proben aus erdfeuchtem Mörtel.
			—	—	—	—	6,8	10,7	—	16,1	Proben aus mauergerechtem Mörtel.
19	Berliner Mörtelwerk	Fertiger Mörtel, von einem Berliner Mörtelwerk bezogen	—	—	—	—	18,8	24,3	—	28,9	Proben aus erdfeuchtem Mörtel.
			—	—	—	—	7,1	9,8	—	13,8	Proben aus mauergerechtem Mörtel.
20 (2|3642)	Westfalen	1 Raumtl. Kalkteig + 3 „ Mauersand	3,8	4,6	—	115 Tage 6,1	11,4	14,9	—	115 Tage 19,9	Der Mörtel wurde erdfeucht eingeschlagen.
			3,1	4,9	—	5,4	4,3	6,0	—	8,6	Der Mörtel wurde mauergerecht eingefüllt.

	[1]) Analyse des rohen Kalksteins:		[2]) Analyse des rohen Kalksteins:		[3]) Analyse des rohen Kalksteins:	
		geglüht		geglüht		geglüht
Glühverlust	43,88 %		43,87 %		43,81 %	
Kieselsäure und Unlösliches	0,22 „	0,39 %	0,25 „	0,45 %	0,36 „	0,64 %
Eisenoxyd und Tonerde	0,10 „	0,18 „	0,12 „	0,21 „	0,10 „	0,18 „
Ätzkalk	55,16 „	98,29 „	55,24 „	98,41 „	54,80 „	97,58 „
Magnesia	0,33 „	0,59 „	0,21 „	0,37 „	0,47 „	0,84 „
Schwefelsäureanhydrid	0,05 „	0,09 „	0,06 „	0,11 „	0,06 „	0,11 „
Rest (Alkalien usw.)	0,26 „	0,46 „	0,25 „	0,45 „	0,40 „	0,71 „

1	2	3	4				5				6
Nr.	Herkunft des Kalkes	Mörtelmischung	Zugfestigkeit in kg/qcm nach				Druckfestigkeit in kg/qcm nach				Bemerkungen
			28 Tagen	3 Monaten	6 Monaten	1 Jahr	28 Tagen	3 Monaten	6 Monaten	1 Jahr	
21	Rüdersdorf	1 Raumtl. Kalkteig + 3 „ Mauersand	6,3	7,1	7,5	8,5	14,2	22,9	28,0	35,8	Kalkteig $R_r = 1,304$ kg Mauersand $R_f = 1,568$ „ „ $R_r = 1,863$ „
22	Westfalen	1 Gewichtstl. Kalkteig + 3 „ Mauersand	5,0	5,4	—	5,5	22,2	29,2	—	28,1	Kalkteig $R_r = 1,231$ kg Mauersand von den Berliner Mörtelwerken.
23	Rüdersdorf	1 Raumtl. Kalkteig + 2 „ Normalsand	—	—	—	—	9,8	15,9	21,0	22,6	Kalkteig $R_r = 1,341$ kg
24	Harz	1 Raumtl. Kalkpulver + 2 „ Normalsand	—	—	—	—	12,1	21,4	28,7	27,3	Kalkpulver $R_f = 0,521$ kg „ $R_r = 0,855$ „
		1 Raumtl. Kalkteig + 2 „ Normalsand	—	—	—	—	13,0	17,7	19,8	23,4	Kalkteig $R_r = 1,341$ kg
25 [1]	Rüdersdorf	1 Raumtl. Kalkteig + 4 „ Berlin. Mauersand [2]	3,3	2,8	—	4,0	6,9	9,6	—	9,9	Kalkteig $R_r = 1,304$ kg
	Kalkrückstände der Azethylen-Fabrikation	1 Raumtl. Kalkteig + 4 „ Berlin. Mauersand [2]	3,2	3,7	—	3,8	7,7	10,1	—	12,4	Kalkteig $R_r = 1,273$ kg
26	Rüdersdorf	1 Raumtl. Kalkteig + 3 „ Normalsand	1,9	2,6	—	2,5	7,9	9,9	—	13,2	Kalkteig $R_r = 1,304$ kg Normalsand $R_f = 1,402$ „ „ $R_r = 1,680$ „
27	Harz	1 Gewichtstl. Kalkteig + 3 „ Berliner Mauersand	—	5,0	5,4	5,5	—	22,2	29,2	28,1	Kalkteig $R_r = 1,231$ kg [3]
			—	4,7	4,4	5,1	—	21,8	25,2	26,0	Kalkteig $R_r = 1,252$ kg [4]
			—	5,6	5,8	5,3	—	25,8	30,2	32,1	Kalkteig $R_r = 1,272$ kg [5]
28	Harz	1 Gewichtstl. Kalkteig + 4 „ Normalsand (Sieb feinstes)	—	—	—	—	8,0	10,7	13,7	—	—
29	Unbekannt [6]	1 Raumtl. Kalkteig + 3 „ Normalsand	3,6	4,9	—	5,2	—	—	—	—	Kalkteig $R_r = 1,400$ kg Wassergehalt: 30,40 %
		1 Raumtl. Kalkteig + 3 „ Mauersand	6,2	8,5	—	8,8	—	—	—	—	

[1]) Diese Untersuchung sollte über die Verwendbarkeit der aus der Azethylen-Fabrikation herrührenden Kalkrückstände (Kalkteig) zur Mörtelbereitung Aufschluß geben.

[2]) Ein Liter des trockenen Mauersandes wog eingelaufen: 1,323 kg; eingerüttelt: 1,597 kg.

[3]) Der Kalk wurde abgelöscht, indem das Wasser in Teilmengen dem gebrannten Kalk zugesetzt wurde.

[4]) Der Kalk wurde abgelöscht, indem das Wasser auf einmal dem gebrannten Kalk zugesetzt wurde.

[5]) Der Kalk wurde nach Vorschlag von Martens abgelöscht.

[6]) Analyse des Kalkes, bezogen auf den wasser- und kohlensäurefreien Zustand:

Kalk	96,99 %
Kieselsäure	0,83 „
Eisenoxyd und Tonerde	1,15 „
Schwefelsäure	0,90 „
	99,87 %

1	2	3	4				5				6
Nr.	Herkunft des Kalkes	Mörtelmischung	Zugfestigkeit in kg/qcm nach				Druckfestigkeit in kg/qcm nach				Bemerkungen
			28 Tagen	3 Monaten	6 Monaten	1 Jahr	28 Tagen	3 Monaten	6 Monaten	1 Jahr	
30	Westfalen[1])	1 Raumtl. Kalkteig + 3 „ Normalsand	4,1	5,2	5,3	—	14,9	22,2	26,6	—	Kalkteig $R_r = 1,882$ kg Wassergehalt: 57,5%
		1 Raumtl. Kalkteig + 3 „ Mauersand	5,1	7,3	7,8	—	16,4	24,4	30,6	—	
		1 Raumtl. Kalkteig + 3 „ feiner Sand	7,2	9,2	10,7	—	11,4	17,5	24,2	—	
31	Schlesien (Nieder-Kauffung)	1 Gewichtstl. Kalkteig + 3 „ Mauersand	7,1	10,3	9,7	—	20,3	26,3	30,6	—	—
32 (2/3556)	Thüringen	1 Raumtl. Kalkteig + 2 „ Normalsand	4,7	5,2	—	—	8,4	15,9	—	—	Kalkteig $R_r = 1,314$ kg Normalsand $R_f = 1,544$ „
		1 Raumtl. Kalkteig + 4 „ Normalsand	3,9	3,1	—	—	11,2	14,1	—	—	Der Mörtel wurde maschinell gemischt und eingeschlagen
		1 Gewichtstl. Kalkteig + 3 „ Mauersand	7,0	6,2	7,5	—	13,6	20,1	21,1	—	Der Mörtel wurde von Hand mit der Kelle gemischt. Einschlagen mit dem Hammerapparat.
		1 Gewichtstl. Kalkteig + 3 „ Mauersand	6,0	8,2	7,2	—	13,6	24,2	26,1	—	Der Mörtel wurde im Mörtelmischer gemischt. Einschlagen mit dem Hammerapparat.
33 (2/3908)	Rheinland (Muschelkalk)	1 Raumtl. Kalkteig + 3 „ Normalsand	2,4	2,9	4,0	3,9	6,7	9,2	13,7	13,0	Kalkteig $R_r = 1,802$ kg Normalsand $\frac{R_f + R_r}{2} = 1,544$ kg
		1 Raumtl. Kalkteig + 4 „ Normalsand	1,6	1,6	3,1	3,0	5,4	7,8	9,0	8,5	
34 (2/247)	Harz[2])	[3]) 1 Raumtl. Kalkteig + 3 „ Normalsand	1,5	60 Tage 1,9	—	—	7,3	60 Tage 8,1	—	—	Kalkteig $R_r = 1,334$ kg „ R_l [5]) = 1,337 kg Normalsand R_l [5]) = 1,468 „ Freienwalder Rohsand R_l [5]) = 1,611 „
		[3]) 1 Raumtl. Kalkteig + 3 „ Freienwalder Rohsand[4])	2,7	3,4	—	—	13,9	14,8	—	—	

[1]) (Nr. 30) Analyse des Kalkes:

Glühverlust	1,24%
Kieselsäure	2,22 „
Eisenoxyd und Tonerde	1,48 „
Ätzkalk	93,43 „
Schwefelsäureanhydrid	0,03 „
Magnesia	0,81 „
Rest (Alkalien usw.)	0,79 „

[2]) Analyse des rohen Kalksteins:

		Geglüht
Glühverlust	43,89%	
Kieselsäure und Unlösliches	0,40 „	0,71%
Eisenoxyd und Tonerde	0,24 „	0,43 „
Kalk	54,87 „	97,79 „
Magnesia	0,18 „	0,32 „
Schwefelsäureanhydrid	0,07 „	0,12 „
Rest (Alkalien usw.)	0,35 „	0,62 „

[3]) Kalkteig und Sand wurden zuerst von Hand, dann unter Anwendung von 20 Schüssel-Umdrehungen des Mörtelmischers (Bauart Steinbrück-Schmelzer) gemischt. Da der gewonnene Mörtel zum Einschlagen zu feucht war, wurde er auf mit Fließpapier belegte Gipsplatten gebracht und, mit Fließpapier bedeckt, so lange darauf belassen, bis er den zum Einschlagen geeigneten Feuchtigkeitsgrad (Erdfeuchte) erreicht hatte. Die Bedeckung mit Fließpapier erfolgte, um den Zutritt der Luft zu verhindern und etwaige Kohlensäureaufnahme durch den Kalkmörtel auszuschließen.

Der erdfeuchte Mörtel wurde auf dem Hammerapparat (Bauart Böhme) unter Anwendung von 150 Schlägen in die Formen (Festhaltung Martens) eingeschlagen.

Dieses Verfahren ist das zurzeit bei Prüfung von Kalk in Kalkteigform übliche.

[4]) Auf dem Siebe mit 20 Maschen für 1 qcm abgesiebt.

[5]) Im 10-Litergefäß ermittelt.

1	2	3	4				5				6
Nr.	Herkunft des Kalkes	Mörtelmischung (Wasserzusatz bezw. -gehalt)	Zugfestigkeit in kg/qcm nach				Druckfestigkeit in kg/qcm nach				Bemerkungen
			28 Tagen	3 Monaten	6 Monaten	1 Jahr	28 Tagen	3 Monaten	6 Monaten	1 Jahr	
35	Westfalen [1])	1 Raumtl. Kalkpulver + 2 „ Mauersand (9,0 %)	2,9	2,7	5,1	—	15,1	20,3	24,9	—	Kalkpulver $B_f = 0{,}427$ kg; „ $B_l = 0{,}475$ „; „ $B_r = 0{,}740$ „; Mauersand (Freienwalder Rohsand) $B_f = 1{,}575$ kg; „ „ $B_l = 1{,}610$ „; „ „ $B_r = 1{,}849$ „
		1 Raumtl. Kalkpulver + 4 „ Mauersand (7,5 %)	2,8	3,7	4,0	—	7,5	10,1	12,2	—	
36 (2/5181)	Mähren [2])	1 Raumtl. Kalkpulver + 2 „ Mauersand (9,0 %)	5,6	7,8	8,7	—	13,5	19,0	24,9	—	
		1 Raumtl. Kalkpulver + 4 „ Mauersand (7,5 %)	3,7	4,1	4,6	—	8,5	10,4	13,8	—	Kalkpulver $B_f = 0{,}425$ kg; „ $B_l = 0{,}455$ „; „ $B_r = 0{,}746$ „; Mauersand, wie unter lfd. Nr. 35.
		1 Raumtl. Kalkpulver + 3 „ Mauersand (8,5 %)	4,0	5,4	5,6	—	7,7 (5,3)[3])	11,0	16,5	—	
		1 Raumtl. Kalkteig + 3 „ Normalsand (7,5 %)	1,3	2,2	1,8	An der Luft erhärtet	6,7	9,1	9,9	An der Luft erhärtet	Kalkteig $B_r = 1{,}362$ kg; Normalsand $B_f = 1{,}402$ „; „ $B_l = 1{,}468$ „; „ $B_r = 1{,}681$ „
			2,7	5,1	5,3	Alle 8 Tage angenäßt	8,4	15,2	17,8	Alle 8 Tage angenäßt	
37	Kalkmörtel von einem Berliner Mörtelwerk	Nach der Analyse: 1 : 5,1 nach Gewichtsteilen 1 : 1,4 nach Raumteilen	7 Tage 3,9	28 Tage 5,7	90 Tage 6,5	—	7 Tage 9,3	28 Tage 13,0	90 Tage 18,6	—	—
38	Herkunft des Kalkes unbekannt	Fertiger Mörtel von einem Berliner Mörtelwerk	—	—	—	—	14 Tage 6,4	28 Tage 7,3	90 Tage 14,0	—	—
39	Desgl.	Desgl.	—	—	—	—	14 Tage 7,6	90 Tage 17,2	180 Tage 21,5	—	—
40	Desgl.	Desgl.	3,2	5,4	4,9	6,2	—	—	—	—	An der Luft erhärtet.
			6,0	9,1	8,5	—	—	—	—	—	Vom 7. Tage an alle 8 Tage in Wasser eingetaucht.
41	Desgl.	Desgl.	5,0	5,9	5,3	—	15,9	23,3	25,2	—	—
42 (2/5067)	Thüringen (Gedämpftes Graukalk-Pulver)	1 Raumtl. Kalkpulver + 2 „ Mauersand (10,0 %)	5,6	An der Luft			13,6	An der Luft			Kalkpulver $B_l = 0{,}516$ kg; Mauersand $B_l = 1{,}708$ „; Das Gemisch aus Kalkpulver, Sand und Wasser wurde 2 Tage lang eingesumpft.
			3,0	3 Tage an der Luft, dann unter feuchtem Sand			7,7	3 Tage an der Luft, dann unter feuchtem Sand			
		1 Raumtl. Kalkpulver + 4 „ Mauersand (7,0 %)	3,0	An der Luft			9,5	An der Luft			
			2,2	3 Tage an der Luft, dann unter feuchtem Sand			5,2	3 Tage an der Luft, dann unter feuchtem Sand			

	[1]) Analyse des Kalkes:		[2])	
		Geglüht		Geglüht
Glühverlust	24,16 %		25,22 %	
Kieselsäure und Unlösliches	0,10 „	0,13 %	0,58 „	0,78 %
Eisenoxyd und Tonerde	0,18 „	0,24 „	0,42 „	0,56 „
Ätzkalk	74,45 „	98,17 „	72,68 „	97,19 „
Magnesia	0,50 „	0,66 „	0,57 „	0,76 „
Schwefelsäureanhydrid	0,38 „	0,50 „	— „	— „
Rest (Alkalien usw.)	0,27 „	0,30 „	0,53 „	0,71 „

[3]) Mauergerecht (mit 17,6 % Wasser) angemacht und auf absaugender Unterlage in die Form gefüllt.

1	2	3	4				5				6
Nr.	Herkunft des Kalkes	Mörtelmischung (Wasserzusatz bezw. -gehalt)	Zugfestigkeit in kg/qcm nach				Druckfestigkeit in kg/qcm nach				Bemerkungen
			28 Tagen	3 Monaten	6 Monaten	1 Jahr	28 Tagen	3 Monaten	6 Monaten	1 Jahr	
43 (25168)	Schlesien [1] (Graukalk in Stückform)	1 Raumtl. Kalkpulver + 3 „ Normalsand (9,7 %)	3,1	3,4	An der Luft		4,7	6,8	An der Luft		Der Stückkalk wurde zu Kalkpulver und Kalkteig abgelöscht. Kalkpulver R_f = 0,422 kg, „ R_r = 0,749 „, „ R_l = 0,487 „
			2,4	3,9	3 Tage an der Luft, dann unter Wasser		3,3	5,9	3 Tage an der Luft, dann unter Wasser		
		1 Raumtl. Kalkteig + 4 „ Normalsand (7,0 %)	2,6	3,2	An der Luft		5,0	8,6	An der Luft		Kalkteig R_l = **1,306** „, Normalsand R_l = 1,468 „

In der Tabelle (Spalte 2) ist der Ursprung der geprüften Kalke nur soweit angegeben, als für die Zwecke dieser Veröffentlichung von Interesse schien. In Spalte 4 und 5 sind die Ergebnisse der Zug- und Druckfestigkeitsversuche, ausgedrückt in kg/qcm, als Mittelwerte aus je zehn Einzelwerten verzeichnet. Spalte 6 enthält die Litergewichte für den pulverförmigen Kalkhydrat im eingelaufenen (R_f) und eingerüttelten (R_r) Zustande und das Litergewicht für den Kalkteig im eingefüllten Zustande (R_l). Dasjenige Litergewicht, das bei der Herstellung der Mischungen nach Raumteilen dem Maßanteil an Kalkpulver oder Kalkteig als Raumgewicht zugrunde gelegt wurde, ist in der genannten Spalte **fett** gedruckt.

Bei Mischungen mit Kalkpulver (in Raumteilen) wurde nämlich in früheren Jahren als Einheitsgewicht das Litergewicht des Materials je nach Wunsch der Antragsteller entweder im eingelaufenen oder im eingerüttelten Zustande benutzt, während in neuerer Zeit als Einheitsgewicht teils das arithmetische Mittel aus den Litergewichten des losee ingelaufenen und fest eingerüttelten Materials, teils das im Zehn-Litergefäß durch Einfüllen des Kalkpulvers oder Kalkteiges ermittelte Liter-(Raum-)Gewicht gewählt wird.

Die Wahl des letzteren dürfte sich bei Bereitung des Mörtels für Versuchszwecke am meisten empfehlen, da das in solcher Weise festgestellte Gewicht den praktischen Verhältnissen am ehesten nahe kommt.

Auf die bei der Prüfung der Kalke gebräuchlichen Versuchsverfahren soll hier nicht näher eingegangen werden. Bemerkt sei nur, daß die für die Mörtelbereitung verwendeten Kalke, soweit nicht fertige, d. h. auf dem Bauplatz oder in Berliner Mörtelwerken bereitete Mörtel zur Prüfung gelangten, möglichst sofort nach der Einlieferung abgelöscht, die Mörtel unter Bemessung des richtigen

---

[1]) Analyse des Kalkes:

		Geglüht
Glühverlust	24,16 %	
Kieselsäure und Unlösliches	4,68 „	6,17 %
Eisenoxyd und Tonerde	2,45 „	3,23 „
Ätzkalk	67,48 „	88,98 „
Magnesia	0,68 „	0,90 „
Schwefelsäureanhydrid	0,10 „	0,13 „
Rest (Alkalien usw.)	0,45 „	0,59 „

Wasserzusatzes[1]) von Hand mit der Kelle (früher) oder im Mörtelmischer (Bauart Steinbrück-Schmelzer) gemischt, die Probekörper durch Einschlagen des erdfeuchten Mörtels in die Formen von Hand oder auf dem Hammerapparat (Bauart Böhme) hergestellt und im Laboratorium an der Luft bei 17—20° C Wärme und annähernd gleichbleibender Luftfeuchtigkeit aufbewahrt wurden.

Wegen der Einzelheiten der Versuchsausführung sei auf Mitt. Materialpr.-Amt 1894, Heft 4, verwiesen.

In neuerer Zeit werden die Mörtel ausschließlich im Mörtelmischer (Bauart Steinbrück-Schmelzer) gemischt, sofern die Korngröße des verwendeten Zuschlagstoffes (Sandes) das Mischen in diesem Apparat gestattet, und auf dem Hammerapparat (Bauart Böhme) mit der Einspannung nach Martens eingeschlagen. Sand mit zu grobem Korn kann im Mörtelmischer nicht gemischt werden.

Allgemein geht aus den mitgeteilten Versuchszahlen hervor, daß die Festigkeit der Kalkmörtel — wenigstens im Vergleich zur Festigkeit anderer Baustoffe, selbst der magersten Portland-Zementmörtel — sehr gering ist und innerhalb äußerst bescheidener Grenzen liegt. So schwankt für 28 Tage alte Proben die Zugfestigkeit der geprüften Kalkmörtel zwischen 1,2 und 4,3 kg/qcm, die Druckfestigkeit zwischen 2,8 und 24,6 kg/qcm. Im Mittel aus sämtlichen Durchschnittswerten beträgt erstere 2,7, letztere 8,9 kg/qcm.

Etwas anders gestalten sich diese Verhältnisse, wenn man die Festigkeit der Mörtel mit Normalsand und mit Bausand getrennt betrachtet, wie die Zahlen in Tab. 58 beweisen, in denen die 28 Tagesfestigkeiten des Mörtels in der Mischung 1 : 3 für Normalsand und Bausand gesondert und neben diesen die Festigkeiten fertig eingereichter Mörtel (aus Mörtelwerken) aufgeführt sind. Hiernach beträgt die mittlere

	Zugfestigkeit	Druckfestigkeit
der Normalsandmörtel	2,5 kg/qcm	8,5 kg/qcm
„ Bausandmörtel	5,0 „	14,6 „
„ fertigen Mörtel	4,6 „	13,8 „

Aus diesen Zahlen ist im übrigen auch der Einfluß der Sandart, der im ersten Abschnitt bereits erörtert ist, deutlich ersichtlich.

Wie sich das Festwerden und das Erhärten von Kalkmörtel vollzieht, ist im ersten Teil dieser Abhandlung ausführlich dargelegt. Hiernach beruht das anfängliche Festwerden des Mörtels nach erfolgter Verarbeitung, d. h. der Übergang aus dem plastischen in den starren Zustand lediglich auf einem physikalischen Vorgange, nämlich dem Eintrocknen und Erstarren des Mörtels (infolge Wasserabgabe) und dem hiermit verbundenen Schwinden desselben. Der plastische Kalkteig schrumpft in dem Maße, in dem er das Wasser abgibt, immer mehr zusammen und die unter dem Druck der Mauersteinschichten (Auflast) stehenden Sandkörner folgen dieser Bewegung und lagern sich enger aneinander, daher das Setzen des Mauerwerks. Bei

[1]) In den meisten Fällen, in denen Kalkteig zur Herstellung der Mörtel zur Verwendung gelangt, wird der Kalkteig zur leichteren und innigeren Vermischung mit dem Zuschlagstoff (Sand) durch vorherigen Zusatz von Wasser verdünnt, so daß die Mörtel nach dem Anmachen zunächst ziemlich wasserreich und daher dünnbreiig sind. Um ihnen das überschüssige Wasser zu entziehen und um sie auf den Zustand der Erdfeuchte zu bringen, werden sie auf mit Fließpapier belegten Gipsplatten solange gelagert, bis sie den geeigneten Feuchtigkeitsgrad (Erdfeuchte) erlangt haben. Während des Lagerns bleiben die Mörtel mit Fließpapier bedeckt, damit die Aufnahme von Kohlensäure aus der Luft und die Bildung kohlensauren Kalkes nach Möglichkeit verhindert wird.

den Mörtelproben, die für die Festigkeitsversuche mit möglichst geringem Wasserzusatz eingeschlagen werden, kommt hierzu noch die künstliche Verdichtung durch die Schlagarbeit, wobei Luft- und Wasserteilchen ausgetrieben und die Sandteilchen aneinandergetrieben werden.

Tab. 58. **Zusammenstellung der mittleren Festigkeiten von 28 Tage alten Kalkmörtelproben mit Normalsand und mit Mauersand in der Mischung 1:3 und aus fertig eingereichtem Mörtel.**
(Nach Tab. 57.)

Lfd. Nr.	1 Kalk + 3 Normalsand		1 Kalk + 3 Mauersand		Fertig eingereichter Mauermörtel [1])	
	Zugfestigkeit kg/qcm	Druckfestigkeit kg/qcm	Zugfestigkeit kg/qcm	Druckfestigkeit kg/qcm	Zugfestigkeit kg/qcm	Druckfestigkeit kg/qcm
1	4,0	—	6,3	14,2	**5,7**	13,0
2	**3,1**	11,8	5,0	22,2	—	**18,8**
3	**1,9**	12,0	**4,7**	21,8	**8,2**	—
4	2,3	8,4	5,6	**25,8**	—	**7,8**
5	2,4	6,8	6,2	—	5,0	**15,9**
6	1,8	**3,7**	5,1	16,4 (Grober Sand)	—	—
7	1,8	6,6	**7,2**	11,4 (Feiner Sand)	—	—
8	1,9	7,9 (Rüdersdorfer)	—	6,8	—	—
9	3,6	—	7,1	20,3	—	
10	**4,1**	**14,9**	2,1	**6,7**	—	—
11	**1,4**	3,9	7,0	13,6	—	—
12	2,6	10,5	6,0	13,6	—	
13	**2,9**	9,4	4,6	14,9	—	—
14	1,9	8,3	**1,8**	7,1	—	—
15	**2,4**	6,7	4,4	7,7	—	—
16	—	—	4,4	18,7		—
17	—	—	3,0	12,6	—	—
Mittel	**2,5**	**8,5**	**5,0**	**14,6**	**4,6**	**13,8**

Mittlere Zugfestigkeit: 3,9 kg/qcm. Mittlere Druckfestigkeit: 12 kg/qcm.

Wie groß der Anteil an der Bindekraft ist, die auf Rechnung dieses rein mechanischen Vorganges des Eintrocknens und Schwindens zu setzen ist, sehen wir am besten am Lehmmörtel, der im Altertum viel benutzt wurde und auch jetzt noch gelegentlich zu Bauteilen ganz untergeordneter Art verwendet wird. (Lehmpisée.) Solcher Mörtel wird ziemlich fest.

Das gleiche Verhalten zeigen die Tone, die ebenfalls je nach dem Grade ihrer Plastizität (Bildsamkeit) beim Eintrocknen eine starre Masse mit mehr oder minder großen Festigkeit bilden.

Diese Eigenschaft der Tone und Lehme, beim Lagern an der Luft aus der plastischen Form in die feste überzugehen, und die hierauf beruhende Verkittungs-

[1]) Die fertig eingereichten Mörtel entstammten Berliner Mörtelwerken. Die Mörtel waren in sogen. mauergerechtem Zustande angeliefert, wurden aber für die Festigkeitsversuche durch teilweises Absaugen des Mörtelwassers auf erdfeuchten Zustand gebracht.



fähigkeit[1]) und Festigkeit ist bei der Herstellung von Ziegel-, Steingut-, Porzellan- usw. Waren von Wichtigkeit, weil geformte Stücke so viel Zusammenhang und Festigkeit besitzen müssen, daß sie, ohne abzubröckeln oder zu zerbrechen, transportiert werden können.

Um den Grad der Wirkung des Eintrocknens und Schwindens kennen zu lernen und die durch diesen physikalischen Vorgang erreichte Bindekraft plastischer Stoffe zahlenmäßig festzustellen, wurden folgende Versuche ausgeführt.

Aus gewöhnlichem Lehm (Töpferlehm) wurden Probekörper für Zug- und Druckfestigkeitsversuche in Normalform hergestellt, indem der plastisch angemachte Lehm in die Form mittels eines Pistills eingedrückt und so lange gestampft wurde, bis eine leichte Wasserabsonderung an der Oberfläche eintrat. Die Proben wurden im Zimmer bis zur Erlangung gleichbleibenden Gewichts aufbewahrt und dann im lufttrockenen Zustande der Festigkeitsprüfung unterzogen. Die gewonnenen Ergebnisse sind in Tab. 59 verzeichnet. Aus ihnen ist ersichtlich,

> daß die Lehmproben nennenswerte Festigkeiten und zwar durchschnittlich höhere aufweisen, als sämtliche in Tab. 57 angegebenen Kalkmörtel bei 28 Tagen Alter.

Da die Festigkeit des Lehmmörtels auffallend hoch erschien, wurde eine weitere, gleiche Versuchsreihe mit einem ähnlichen Stoffe, nämlich Ton, ausgeführt. Für diese Versuche wurden geformte rohe Tondachsteine durch Zusatz von Wasser so weit aufgeweicht, daß der Ton wieder plastisch wurde, und die plastische Masse durch leichtes Einschlagen in Formen zu Probestücken geformt. Die Prüfung der bis zur Gewichtsgleichheit an der Luft gelagerten Körper lieferte die ebenfalls in Tab. 59 wiedergegebenen Festigkeitswerte. Diese sind sogar, wie ersichtlich, noch höher ausgefallen, als die des Lehmmörtels.

> Aus den Ergebnissen beider Versuchsreihen geht ohne weiteres der Einfluß des Eintrocknens oder Schwindens auf die Verkittung und die Festigkeit plastischer Massen hervor.

Das Festwerden des Mörtels wurde in beiden Fällen lediglich durch die infolge Wasserabgabe eintretende mechanische Bindung bewirkt; denn jede Erhärtung etwa infolge chemischer Einflüsse war ausgeschlossen.

Im Jahre 1904[2]) sind in der Landwirtschaftsabteilung der Vereinigten Staaten Nordamerikas ebenfalls Festigkeitsversuche mit verschiedenen Tonen ausgeführt[3]) und hierbei folgende Durchschnittswerte gefunden worden:

Reine Koaline	0,35	bis	1,40	kg/qcm
Gewöhnliche Ziegeltone	2,1	„	7,0	„
Töpfertone	7,0	„	35,0	„
Kugel- und andere sehr plastische Tone . .	14,0	„	35,0	„

1) „Ursachen der Verkittungsfähigkeit von Steinmehl und der Plastizität der Tone". Baumaterialienkunde 1903. Heft 24. S. 362 ff. — R. Zschokke, Untersuchungen über die Plastizität der Tone. Baumaterialienkunde 1902. Heft 24, 25/26. 1903. Heft 1/2, 3/4, 5/6. — „The cementing power of road materials". United States Department of Agriculture. Bureau of Chemistry. Circular Nr. 85. 1904. Government Printingoffice, Washington. — „Die Bildsamkeit der Tone". Baumaterialienkunde 1904. Heft 8. S. 124/85.

2) Die Versuche des Verfassers wurden im Betriebsjahre 1900/01 ausgeführt.

3) „The useful properties of clays". United States Department of Agriculture. Bureau of Chemistry. Circular Nr. 17. 1904. Government Printing Office Washington.



Tab. 59. Prüfung von Lehm- und Tonproben auf Zug- und Druckfestigkeit [1]).

Im lufttrockenen Zustande geprüft.

Abmessungen der Probekörper bei der Herstellung:
Zugproben: Normalformat; Zerreissungsquerschnitt = 5 qcm;
Druckproben: Würfel von 7,1 cm Kantenlänge; gedrückte Fläche = 50 qcm.

Versuch Nr.	Zugfestigkeit kg/qcm [2])	Druckfestigkeit kg/qcm [2])	Bemerkungen
		Versuchsreihe 1 (Töpferlehm)	
1	6,7	37,5	Der Lehm bezw. Ton wurde im plastischen Zustande in die Formen mittelst eines Pistills eingedrückt und mit leichten Schlägen eingestampft. Die Proben lagerten bis zur völligen Gewichtsgleichheit an der Luft im Zimmer bei mittlerer Wärme und Luftfeuchtigkeit. Die Körper waren sehr geschwunden.
2	6,9	34,5	
3	6,3	31,0	
4	8,5	41,0	
5	8,2	36,0	
6	6,8	34,0	
7	9,0	34,0	
8	7,5	36,5	
9	4,6	35,0	
10	6,2	32,5	
Mittel	**7,1**	**35,2**	
		Versuchsreihe 2 (Ziegelton)	
1	8,1	37,6	Art der Herstellung und Lagerung der Proben wie vorhin. Die Körper waren sehr geschwunden. Die Schwindung betrug im Mittel: 23 %.
2	10,6	41,6	
3	8,4	42,8	
4	11,1	41,6	
5	9,7	37,0	
6	8,2	35,0	
7	10,0	42,8	
8	6,7	44,0	
9	10,6	46,4	
10	10,0	42,6	
Mittel	**9,8**	**41,1**	

Ist hiernach die Anfangserhärtung des Luftkalkmörtels ausschließlich eine Folge mechanischer Bindung — der Anteil an Bindekraft, der im ersten Erhärtungsstadium etwa der Bildung kohlensauren Kalkes zuzuschreiben ist, fällt nicht ins Gewicht —, so beruht die Nacherhärtung, d. i. die nach dem Anziehen oder Abbinden allmählich fortschreitende Festigkeit des Mörtels ausschließlich auf dem chemischen Vorgange der Umwandlung des im Mörtel enthaltenen Kalkhydrates in kohlensauren Kalk.

[1]) Die Versuche wurden im Betriebsjahre 1900—1901 ausgeführt.

[2]) Die angegebenen Werte (kg/qcm) sind auf den Querschnitt der Probekörper im Zustande der Anfertigung bezogen. In Wirklichkeit sind die Werte höher, weil die Schwindung der in Normalformat hergestellten Körper bei der Prüfung und bei der Berechnung der Werte nicht berücksichtigt worden ist.

Was die Erhärtungsfähigkeit, d. i. den Grad der Festigkeitszunahme der Kalkmörtel mit fortschreitendem Alter betrifft, so zeigen die Werte der Tab. 57, daß die Zugfestigkeit dieser Mörtel ziemlich schnell ihr Ende erreicht, während die Druckfestigkeit mit wachsendem Alter innerhalb der beobachteten Zeiträume immer noch, wenn auch nur langsam, fortschreitet. Dieses verschiedene Verhalten der Zug- und Druckproben hat seinen Grund hauptsächlich in der verschiedenen Materialverteilung in den beiden Probearten. Diese bewirkt nämlich, daß in dem verhältnismäßig kleinen bei der Zugbeanspruchung zur Wirkung gelangenden Querschnitt der Zugproben der Übergang des Kalkhydrats in kohlensauren Kalk früher abgeschlossen ist, als in dem größeren und mehr Ätzkalk enthaltenden Querschnitt der Druckproben, abgesehen davon, daß auch die ganze Form der Zugproben für die Kohlensäureaufnahme günstiger ist, als die der Druckproben. Jene besitzen nämlich einen im Verhältnis zum Raum- (Körper-) inhalte etwas größeren Umfang als diese. Das Verhältnis von Inhalt zu Oberfläche beträgt

bei den Zugproben . . . $70 : 68 = 1{,}03$
und bei den Druckproben $355 : 300 = 1{,}18$.

Hierzu kommt noch, daß überhaupt mit zunehmender Druckfestigkeit die elastischen Eigenschaften des Materials sich mehr und mehr verringern, welche Erfahrung bekanntlich auch bei Mörteln aus andern Bindemitteln gemacht wird. Es empfiehlt sich übrigens, dem Zugversuch nicht zu hohen Wert beizumessen, da er, wie Bauschinger[1]), Feret[2]) und andere Forscher nachgewiesen haben, weniger zuverlässig ist, als der Druckversuch[3]), weshalb es praktisch zweckmäßig ist, den Druckversuch allein als Wertmesser zu benutzen.

Wenn trotz der aus den mitgeteilten Festigkeitsziffern ersichtlichen Geringwertigkeit der Luftkalkmörtel die Standfestigkeit der Gebäude im allgemeinen durch die Verwendung solcher Mörtel nicht gefährdet ist, so liegt dies daran, daß die Tragfähigkeit normal belasteten Mauerwerks, solange nur der Widerstand gegen Druckbeanspruchung in Frage kommt, sehr wesentlich von der Festigkeit des Steinmaterials abhängig ist und die Mörtelfestigkeit für diese Art der Beanspruchung von geringer Bedeutung ist, da der in dünnen Fugen zwischen den Mauersteinen vermauerte Mörtel fast ausschließlich auf Druckfestigkeit beansprucht wird, — wohl gemerkt, solange es sich um gewöhnliche Verhältnisse handelt — und die Druckfestigkeit (Fugenfestigkeit) des im Mauerwerk sich festigenden, die Unebenheiten des Mauerwerks ausgleichenden Mörtel, auch ohne Erhärtung durch Kohlensäureaufnahme[4]), in den dünnen Lagerfugen erheblich größer ist, als

[1]) Bauschinger, Mitteilungen aus dem mechanisch-technischen Laboratorium der Kgl. Polytechnischen Schule in München. 1879. Heft 8.

[2]) Feret, Etudes sur la Constitution intime des Mortiers hydrauliques. Bulletin d'Encouragement pour l'Industrie nationale 1897.

[3]) Martens, Über den Sicherheitsgrad und die Beurteilung der Festigkeitsversuche nach den Normen für Zementprüfung. Mitt. Materialpr.-Amt 1900. S. 91; vergl. auch Tonindustrie-Zeitung 1900. S. 523. — Burchartz, Der Zugversuch als Wertmesser für Portlandzement. Tonindustrie-Zeitung 1902. S. 449.

[4]) Daß eine nach dem Inneren der Mörtelfuge weiter vordringende Erhärtung durch Bildung von kohlensaurem Kalk nicht unbedingt erforderlich ist, bestätigt eben die durch die praktische Erfahrung bewiesene Standsicherheit der in Kalkmörtel errichteten Gebäude. Voraussetzung ist natürlich, daß stark belastetes Mauerwerk nicht in Kalkmörtel gemauert ist oder sonst keine Konstruktionsfehler, bezw. Verstöße gegen die Regeln der Baukunst (schlechter Verband usw.) gemacht werden.

die Würfelfestigkeit des gleichen Materials (Gesetz der Ähnlichkeiten[1]): die Druckfestigkeit wächst bei sonst gleichbleibendem Querschnitt proportional dem Wert $\frac{\sqrt{f}}{h}$, worin f die gedrückte Fläche und h die Höhe des gedrückten Körpers bedeutet).

Den gleichen Zweck wie der Mörtel würde auch eine sonst plastische oder pulverförmige, die Unebenheiten der Steine ausgleichende, an sich nicht bindende und verkittende Masse erfüllen, natürlich nur solange es sich um die Übertragung von im Sinne der Schwerkraft wirkenden Druckspannungen handelt. So dürfte bekannt sein, daß man in manchen Gegenden statt mit Kalkmörtel mit sogenanntem Scheidekalk (Abfallstoff der Zuckerfabrikation) und sogar mit Straßenschlick mauert, also mit Stoffen, die keinen Anspruch darauf machen, eine auf chemischen Einflüssen beruhende Erhärtungsfähigkeit zu besitzen, deren Zusammenhang vielmehr lediglich auf der Verkittungsfähigkeit beruht, wie sie plastischen Stoffen überhaupt eigen ist. Die die Unebenheiten der Ziegelflächen ausgleichende Zwischenlage könnte sogar fortfallen, wenn eine genügend ebene Auflagefläche der Steine (etwa durch Abschleifen) in der Lagerfuge geschaffen würde; wie denn bekanntlich die alten Griechen die einzelnen Trommeln der Säulen ihrer Tempel ohne Bindemittel aufeinandersetzten und die gleichmäßige Übertragung der Druckspannung in der Weise erreichten, daß die Flächen der aufeinander zu lagernden Steine eben geschliffen wurden.

b) Einfluß der Beschaffenheit (Festigkeit) des Fugenmaterials auf die Festigkeit von Körpern aus zusammengesetzten Steinhälften[2]).

Um planmäßig festzustellen, ob und in welchem Grade die Festigkeit von Mauerwerk durch die Art des Fugenmaterials beeinflußt wird, wurden folgende Versuche ausgeführt:

Je eine gleiche Anzahl Mauersteine verschiedener Herkunft und Festigkeit (drei Sorten gebrannte Ziegel und eine Sorte Kalksandsteine) wurden auf der Steinsäge in der Mitte durchgeschnitten und die gewonnenen Hälften auf je einer Flachseite (der späteren Druckfläche) mit reinem Portland-Zement in der üblichen Weise abgeglichen.

I. Je eine Reihe von 20 Steinhälften jeder Sorte wurden mit
   1. reinem Zementmörtel,
   2. Zement-Sandmörtel (1 Raumteil Zement + 3 Raumteile Mauersand),
   3. Kalkmörtel (bezogen aus einem Berliner Mörtelwerk)

   zu würfelförmigen Körpern aufeinander gemauert. Die Dicke der Fuge betrug etwa 1 cm. (Fig. 37.)

II. Bei einer weiteren Reihe von je 20 Steinhälften wurde die Fuge gebildet aus
   4. Zementpulver,
   5. feinkörnigem trocknen Sand
   6. „ feuchten „
   7. angefeuchtetem Sägemehl.

   } Fig. 38.

[1]) Bauschinger, Mitteilungen aus dem mechanisch-technischen Laboratorium der Technischen Hochschule in München. Heft 6 und Martens, Materialienkunde. I. 1898. S. 111 u. 113. Verlag von Julius Springer, Berlin.

[2]) Steinhälften von Steinen in Normalformat.

III. Weitere je 20 Steinhälften wurden auf der anderen nicht abgeglichenen Fläche eben geschliffen und die je zwei zugehörigen Hälften mit der abgeschliffenen Seite bei der Druckprobe zusammengesetzt.

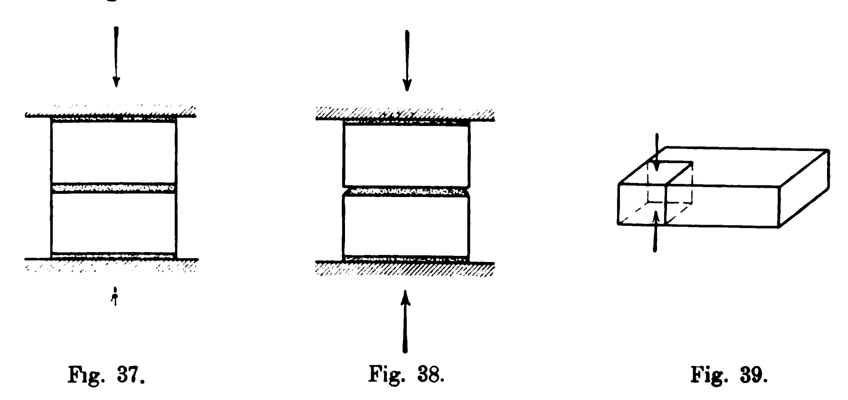


Fig. 37. Fig. 38. Fig. 39.

Einfluß der Art (Festigkeit) des Fugenmaterials auf die Druckfestigkeit von Körpern aus Steinhälften.

Tab. 60. Ergebnisse der Druckversuche mit Kalksandsteinen.

Vorversuch.

Mittlere Abmessungen der Steine: 25,0 . 12,0 . 6,5 cm; mittlere Abmessungen der Versuchsstücke aus je 2 Steinhälften: 12,0 . 12,0 . 15,0 cm; gedrückte Fläche = 144 qcm. Bei 28 Tagen Alter im lufttrockenen Zustande geprüft.

Art der Fuge	Gemauerte Fuge aus		Lose Fuge aus		
	reinem Zementmörtel	Kalkmörtel (von einem Berliner Mörtelwerk)	Zementpulver	feinem trockenem Sand	feinem feuchtem Sand
Versuch Nr.	Gesamt-Bruchlast für die Zerstörung in kg				
1	20 300	14 650	17 600	15 000	12 850
2	17 600	14 800	13 450	17 900	14 800
3	21 400	14 150	13 250	14 300	15 000
4	17 100	15 000	13 000	13 900	15 500
5	17 600	15 250	17 000	17 100	16 100
6	—	—	16 900	16 400	14 900
7	—	—	13 400	17 100	13 800
8	—	—	16 200	15 200	13 800
9	—	—	17 000	12 400	16 300
10	—	—	14 400	14 600	16 700
Mittel	18 800	14 770	15 220	15 390	14 975
Mittlere Druckfestigkeit σ_{-B} in kg/qcm	**131**	**103**	**106**	**107**	**104**

Um gleichzeitig das Verhältnis der Festigkeit der Körper aus zusammengemauerten Ziegelhälften zu der Material-(Würfel-)festigkeit der Steine kennen zu lernen, wurden

IV. aus Steinen der verschiedenen Sorten Würfel auf der Steinsäge nach Maßgabe der Fig. 39 herausgeschnitten und auf den Druckflächen eben geschliffen [1]).

Sämtliche Körper lagerten im Zimmer an der Luft und wurden bei 28 Tagen Alter der (gemauerten) Fuge der Druckprobe unterzogen. Bei den Materialwürfeln wurden als Druckflächen diejenigen Flächen der Würfel gewählt, die vorher die Lagerflächen der Steine gebildet hatten (Fig. 39). Die Druckrichtung ist durch die Pfeile angedeutet.

Die Ergebnisse sind in den Tab. 61—64 verzeichnet. Die Mittelwerte sind nebst den Verhältniszahlen (Körperfestigkeit = 100) in Tab. 65 übersichtlich zusammengestellt.

Tab. 61. Reihe 1. **Ergebnisse der Druckversuche mit Birkenwerder Klinkern.**
Mittlere Abmessungen der ganzen Steine: 25,0 . 12,0 . 6,5 cm; mittlere Abmessungen der Versuchsstücke aus zwei Steinhälften: 11,9 . 11,9 . 15,0 cm; gedrückte Fläche = 142 qcm.

Art der Fuge	Gemauerte Fuge aus			Lose Fuge aus				Ohne Fuge aufeinander gelegte Ziegelhälften mit abgeschliffenen Fugenflächen; h = 14,2 cm	Würfel aus den Steinen geschnitten	
	reinem Zementmörtel (Rüdersdorfer)	1 Teil Zement + 3 Teile Mauersand [2])	Kalkmörtel (Berliner Mörtelwerke)	Zementpulver [3])	feinem trockenem Sand [3])	feinem feuchtem Sand [3])	feuchtem Sägemehl [3])		Reihe 1 Mittlere Abmessungen 6,25 . 6,18 . 6,24 cm; gedrückte Fläche = 39,0 qcm	Reihe 2 Mittlere Abmessungen 6,0 . 6,0 . 6,0 cm; gedrückte Fläche = 36,0 cm
Versuch Nr.	Gesamt-Bruchlast für die Zerstörung [4]) in kg									
1	47 240	55 940	33 240	24 060	36 130	39 520	48 690	52 560	25 030	17 300
2	63 180	53 040	30 820	33 720	31 300	36 620	49 660	41 930	30 340	27 500
3	54 270	47 730	39 520	38 070	31 300	35 170	52 560	55 940	20 200	28 900
4	50 140	55 450	46 760	38 070	18 260	33 720	28 410	59 800	17 300	22 450
5	55 450	62 700	38 550	47 730	30 340	43 380	39 520	63 670	32 750	28 100
6	50 620	59 800	34 690	25 510	23 580	39 520	36 620	58 840	12 950	28 500
7	63 180	62 700	33 240	35 170	18 260	26 960	30 340	67 050	23 090	25 000
8	49 660	49 660	32 270	40 480	21 640	32 270	32 270	37 100	28 410	19 700
9	54 010	62 700	36 130	36 620	18 260	27 440	31 790	53 040	30 820	29 100
10	54 970	56 630	37 580	40 960	33 720	20 200	33 720	52 560	28 410	25 400
Mittel	54 272	56 635	36 280	36 039	26 279	33 480	38 358	54 249	24 930	25 195
Mittlere Druckfestigkeit σ_{-B} in kg/qcm	**382**	**399**	**255**	**254**	**185**	**236**	**270**	**382**	**639**	**700**

[1]) Die Kantenlänge der Würfel wurde gleich der Dicke der Steine gewählt. Beim Schneiden wurde darauf geachtet, daß die Brennkruste der gebrannten Steine möglichst erhalten blieb. Jeder Würfel besaß mindestens drei Flächen mit erhaltener Brennkruste. Bei späteren Versuchen wurde beobachtet, daß es gleichgültig war, ob die Brennkruste erhalten blieb oder nicht, da die Würfel, bei denen nur an einer Seite die Brennkruste erhalten blieb, ebenso hohe oder manchmal höhere Werte lieferten, wie die Würfel mit zwei oder drei erhaltenen Seiten.

[2]) Der Mörtel wurde aus der Fuge gedrückt, ehe die vollständige Zerstörung der Steinhälften eintrat.

[3]) Das Fugenmaterial bildete keine vollständige Fuge, sondern fiel an den Rändern in einem bestimmten Böschungswinkel ab; es wurde beim Versuch aus der Fuge gedrückt und bis zu einer gewissen Dicke zusammengepreßt (siehe Fig. 38).

[4]) Die Rißbildung trat bei den in reinem Zement und Zementsandmörtel vermauerten Körpern, den ohne Fugenfüllung gebildeten Körpern und den Materialwürfeln gleichzeitig mit der Zerstörung, bei den Körpern mit Kalkmörtel und losem Fugenmaterial früher als diese ein.

Tab. 62. Reihe 2. **Ergebnisse der Druckversuche mit Rathenower Mauersteinen.**

Mittlere Abmessungen der ganzen Steine: 24,5 . 11,7 . 6,2 cm; mittlere Abmessuugen der Versuchsstücke aus zwei Steinhälften: 11,9 . 11,7 . 14,6 cm; gedrückte Fläche = 139 qcm.

Art der Fuge	Gemauerte Fuge aus				Lose Fuge aus			Ohne Fuge aufeinander gelegte Ziegelhälften mit abgeschliffenen Fugenflächen; h = 14,1 cm	Würfel aus den Ziegeln geschnitten. Mittlere Abmessungen: 6,5 . 6, . 6,2 cm; gedrückte Fläche: 42,3 qcm
	reinem Zementmörtel (Rüdersdorfer)	reinem Zementmörtel (Stettiner)	1 Teil Zement + 3 Teile Mauersand	Kalkmörtel (Berliner Mörtelwerke)	Zementpulver [1]	feinem trockenem Sand [1]	feinem feuchtem Sand [1]		
Versuch Nr.	Gesamt-Bruchlast für die Zerstörung [2] in kg								
1	15 580	17 500	19 490	11 810	13 220	13 220	12 750	14 300	5 500
2	18 000	12 280	15 110	10 860	18 990	8 500	13 220	14 200	6 800
3	22 470	15 580	18 000	16 060	19 490	13 220	14 170	17 100	8 430
4	20 480	19 990	22 470	17 000	18 000	15 110	10 390	15 700	4 850
5	17 000	18 000	18 990	9 920	17 500	12 750	15 110	21 000	6 250
6	18 490	19 990	18 000	17 500	16 060	12 280	12 280	18 700	5 810
7	16 060	16 060	20 480	14 170	17 500	14 170	9 440	14 300	10 110
8	14 640	20 980	17 000	21 980	19 490	12 280	9 920	19 200	6 000
9	19 490	22 470	18 990	9 920	15 580	17 000	11 330	15 300	5 100
10	18 990	26 950	15 580	10 860	19 990	10 860	15 110	15 300	8 000
Mittel	18 120	18 980	18 411	14 008	17 582	12 939	12 372	16 510	6 685
Mittlere Druckfestigkeit σ_{-B} in kg/qcm	**130**	**137**	**132**	**96**	**126**	**93**	**89**	**119**	**158**

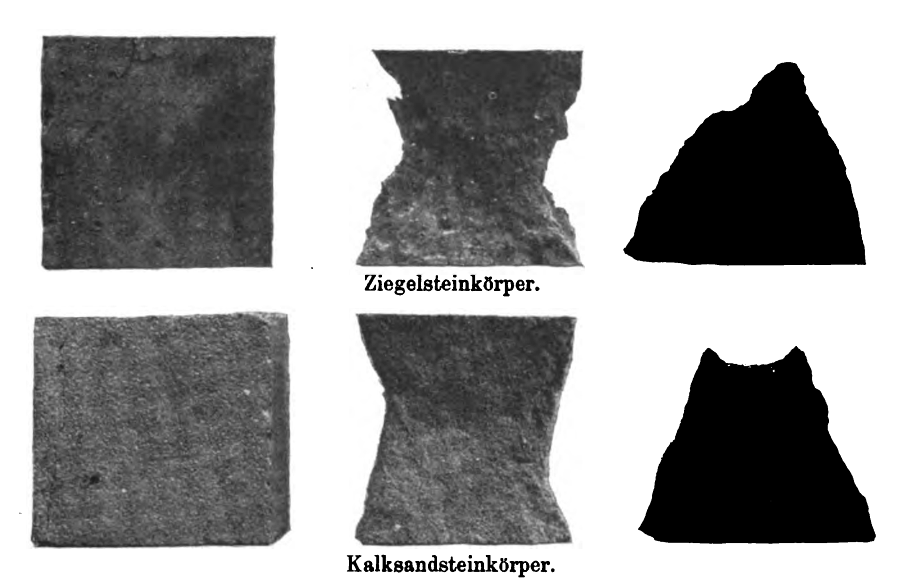
Vorversuche mit Kalksandsteinen, die sich wegen ihrer regelmäßigen Form und ihrer ebenen Lagerflächen für die beabsichtigten Versuche besonders eigneten, lieferten die in Tab. 60 enthaltenen Ergebnisse.

Bei der Prüfung selbst wurden folgende Beobachtungen gemacht:

a) Bei den Proben mit Fugen aus losem Material war der Fugenraum nicht vollständig ausgefüllt, da das Material infolge seines lockeren Zusammenhanges seitlich in einem bestimmten Böschungswinkel abfiel (Fig. 38) es kamen daher auch nicht die ganzen Flächen der Steinhälften in der; Fuge bei der Druckbeanspruchung zur Wirkung, sondern nur ein Teil der Flächen.

b) Bei den mit reinem Zement und mit Zementmörtel vermauerten Versuchsstücken, den Proben aus lose aufeinander gesetzten Steinhälften und den Steinwürfeln trat die Rißbildung nahezu im Augenblicke der Zerstörung ein, bei den mit Kalkmörtel vermauerten Probekörpern und denen mit lockerem Fugenmaterial etwas früher, als die Zerstörung. Genau ließ sich dieser Zeitpunkt jedoch nicht feststellen; von einer Angabe der Bruchlasten für den Eintritt der Risse ist daher in den Tabellen Abstand genommen worden. Art und Verlauf der Zerstörung der geprüften Materialwürfel ist für zwei Steinsorten (Rathenower Mauersteine und Kalksandsteine) durch Fig. 40 veranschaulicht.

[1] Siehe Bemerkung 2 zu Tab. 61.
[2] „ „ 3 „ „ 61.



Ziegelsteinkörper.

Kalksandsteinkörper.

Fig. 40.
Druckprobekörper (Würfel) aus Ziegel- und Kalksandsteinen in verschiedenen Zuständen der Zerstörung.

Tab. 63. Reihe 3. **Ergebnisse der Druckversuche mit roten Hintermauerungssteinen.**

Mittlere Abmessungen der Steine: 25,0 . 12,0 . 6,5 cm; mittlere Abmessungen der Versuchsstücke aus zwei Steinhälften: 12,0 . 12,0 . 14,3 cm; gedrückte Fläche = 144 qcm.

Art der Fuge	Gemauerte Fuge aus			Lose Fuge aus				Ohne Fuge aufeinandergelegte Ziegelhälften mit abgeschliffenen Fugenflächen; h = 14 cm	Würfel aus den Ziegeln geschnitten. Mittlere Abmessungen: 6,0 . 6,0 . 6,0 cm, gedrückte Fläche = 36,0 qcm
	reinem Zementmörtel	1 Teil Zement + 3 Teile Mauersand	Kalkmörtel (Berliner Mörtelwerk)	reinem Zementpulver[1]	feinem trockenem Sand[1]	feinem feuchtem Sand[1]	feuchtem Sägemehl[1]		
Versuch Nr.	Gesamt-Bruchlast für die Zerstörung[2]) in kg								
1	16 550	13 900	10 650	13 200	10 000	10 600	13 900	12 900	3 600
2	18 550	15 650	10 550	11 200	9 700	14 600	12 050	12 050	4 900
3	13 900	11 400	14 250	11 700	10 600	13 750	15 200	15 400	4 800
4	13 650	17 700	12 250	10 600	9 800	14 450	16 200	14 400	4 900
5	11 100	14 250	11 100	11 600	11 400	12 000	17 500	10 350	4 000
6	13 700	13 450	12 100	10 700	10 900	14 600	12 300	10 200	3 800
7	14 300	12 600	14 800	11 200	9 500	11 550	13 250	17 900	5 950
8	11 650	11 750	15 350	10 200	7 000	13 450	12 750	13 700	6 700
9	15 300	12 500	11 850	12 100	11 000	14 050	10 150	15 200	3 300
10	10 500	17 050	10 100	11 300	13 850	12 600	12 400	15 300	6 200
Mittel	13 920	14 025	12 300	11 380	10 375	13 165	13 570	13 740	4 815
Mittlere Druckfestigkeit σ_{-B} in kg/qcm	97	97	85	79	72	91	94	95	134

[1]) Vergl. Bemerkung 2 zu Tab. 61.
[2]) Vergl. Bemerkung 3 zu Tab. 61.

c) Bei den mit Kalkmörtel vermauerten Körpern und denen mit losem Fugenmaterial drückte sich die wegen ihrer geringen Festigkeit nachgiebige Fugenmasse infolge des Druckes unter gleichzeitigem seitlichen Austreten aus dem Fugenraum mehr oder weniger zusammen. Nach Beendigung des Versuches wurde festgestellt, daß das Fugenmaterial am Rande ganz locker war, während es nach der Mitte mehr und mehr an Festigkeit zugenommen hatte, d. h. die ursprünglich nur wenig feste (Kalkmörtel) oder gänzlich lockere (Zementpulver, Sand, Sägemehl) Fugenmasse erwies sich als ein plattenförmiger Körper, dessen Festigkeit in der Mitte am größten war und von da aus nach dem Rande zu allmählich abnahm. Dies wurde namentlich bei den Steinen mit ebenen Lagerflächen, also besonders bei den Kalksandsteinen, übereinstimmend und gut beobachtet.

Tab. 64. Reihe 4. **Ergebnisse der Druckversuche mit Kalksandsteinen.**

Mittlere Abmessungen der Steine: 25,0 . 12,0 . 6,5 cm; mittlere Abmessungen der Versuchsstücke aus zwei Steinhälften: 12,0 . 12,0 . 15,3 cm; gedrückte Fläche: 144 qcm.

Art der Fuge	Gemauerte Fuge aus			Lose Fuge aus				Ohne Fuge aufeinander gelegte Ziegelhälften mit abgeschliffenen Fugenflächen; h = 14,2 cm	Würfel aus den Ziegeln geschnitten. Mittlere Abmessungen: 6,7 . 6,7 . 7,1 cm[3]); gedrückte Fläche = 45,0 qcm
	reinem Zementmörtel	1 Teil Zement + 3 Teile Mauersand[1])	Kalkmörtel (Berliner Mörtelwerk)	reinem Zementpulver[2])	feinem trockenem Sand[2])	feinem feuchtem Sand[2])	feuchtem Sägemehl[2])		
Versuch Nr.	Gesamt-Bruchlast für die Zerstörung[4]) in kg								
1	26 250	22 700	20 650	23 200	22 450	20 600	24 150	26 700	7 600
2	25 650	23 400	22 050	23 500	24 950	23 900	24 650	26 200	8 250
3	24 300	24 100	21 050	25 200	25 150	21 700	25 500	28 150	7 750
4	26 650	24 800	21 800	24 500	22 150	22 350	25 100	32 500	8 250
5	27 900	24 750	22 450	25 000	25 600	21 200	24 500	31 200	7 900
6	27 800	26 400	22 800	23 950	24 350	22 600	—	—	7 300
7	29 000	28 000	23 200	23 150	25 050	22 700	—	—	8 000
8	25 800	24 100	23 050	24 400	22 250	22 250	—	—	7 950
9	26 800	24 800	21 000	23 850	23 300	20 500	—	—	7 800
10	26 500	25 400	23 900	26 250	24 200	21 600	—	—	9 100
Mittel	26 665	24 845	22 195	24 300	23 945	21 940	24 780	28 950	7 990
Mittlere Druckfestigkeit σ_{-B} in kg/qcm	**185**	**178**	**154**	**169**	**166**	**152**	**172**	**201**	**178**

Es wurden also die gleichen Erscheinungen (ungleiche Druckverteilung) festgestellt, die früher bereits Bauschinger[5]), Föppl[6]), Giovanni Salemi

[1]) Der Mörtel war anscheinend mangelhaft erhärtet.

[2]) Siehe Bemerkung 2 zu Tab. 61.

[3]) Die Würfel wurden auf der einen Druckfläche abgeschliffen und auf der anderen mit Zementmörtel 1 : 1 abgeglichen.

[4]) Siehe Bemerkung 3 zu Tab. 61.

[5]) Mitteilungen aus dem mechanisch-technischen Laboratorium der Kgl. Polytechn. Hochschule in München. 1873. Heft 1. S. 6 u. 7.

[6]) Föppl, Zur Frage der Abhängigkeit der Bruchgefahr von der Art des Spannungszustandes. Zentralblatt d. Bauverwaltung 1899. S. 527.



Pooce[1]) und Kieck[2]) bei ähnlichen Versuchen (Wirkung weicher Zwischenlagen beim Druckversuch) beobachtet und studiert haben.

Die Arbeiten dieser Forscher haben an anderer Stelle eingehende Würdigung erfahren. Es sei an dieser Stelle nur auf sie hingewiesen.

Tab. 65. **Zusammenstellung der Mittelwerte nach Tab. 60—64 und Verhältniszahlen.** (Siehe Fig. 41.)

Ziegelsorte	Gemauerte Fuge aus			Lose Fuge aus				Ohne Fugenfüllung. Steine mit geschliffenen Lagerflächen	Materialwürfel
	reinem Zement	Zementmörtel 1 + 3	Kalkmörtel	Zementpulver	feinem Sand trocken	feinem Sand feucht	Sägemehl feucht		
Druckfestigkeit (für die Zerstörung) in kg/qcm									
Kalksandsteine (Vorversuch)	131	—	103	106	107	104	—	—	—
Birkenwerder Klinker	382	399	255	254	185	236	270	382	639
Rathenower Hintermauerungssteine	130	132	96	126	93	89	—	119	158
Rote Hintermauerungssteine	97	97	85	79	72	91	94	95	134
Kalksandsteine	185	173	154	169	166	152	172	201	178
Verhältniszahlen; Festigkeit der Körper aus mit reinem Zement zusammengemauerten Steinhälften (Körperfestigkeit) = 100									
Kalksandsteine (Vorversuch)	100	—	79	81	82	79	—	—	—
Birkenwerder Klinker	100	104	67	66	48	62	71	100	167
Rathenower Hintermauerungssteine	100	102	74	97	72	68	—	92	122
Rote Hintermauerungssteine	100	100	88	81	74	94	97	98	138
Kalksandsteine	100	94	83	91	90	82	93	109	96
Mittel	**100**	**100**	**78**	**88**	**73**	**77**	**87**	**100**	—

Aus den gewonnenen Ergebnissen, die zum leichteren Vergleiche und zur besseren Darstellung des Einflusses des Fugenmaterials auf die Festigkeit der Körper in Tab. 65 als Mittelwerte und als Verhältniszahlen (bezogen auf die Festigkeit der mit reinem Zement vermauerten Körper) d. i. die Körperfestigkeit zusammengestellt und außerdem in Fig. 41 veranschaulicht sind, geht folgendes hervor:

---

1) Pooce, Über die Druckfestigkeit der Gesteine unter dem Einflusse elastischer Substanzen zwischen den Druckflächen. Baumaterialienkunde 1902. Nr. 16, 17 u. 18.

2) Kieck, Über den Einfluß der Schmiermittel auf die Formänderungen bei Druckversuchen und auf den Reibungskoeffizienten. Baumaterialienkunde 1903. Nr. 11. S. 145.

1. Die mit Zementmörtel vermauerten Proben (100) haben nahezu dieselben Festigkeiten ergeben, wie die mit reinem Zement hergestellten (100);
2. Die Festigkeit der Versuchsstücke mit Fuge aus Kalkmörtel (78) und lockerem Fugenmaterial (73—87) ist geringer, als die der Körper mit Fuge aus reinem Zement;
3. Die Körper aus lose aufeinander gelegten Steinhälften (100) haben durchschnittlich die gleichen Ergebnisse geliefert, wie die mit reinem Zement vermauerten;
4. Die Festigkeit der Materialwürfel ist mit Ausnahme eines Falles (Kalksandsteine) höher, als die der Proben mit reiner Zementfuge.

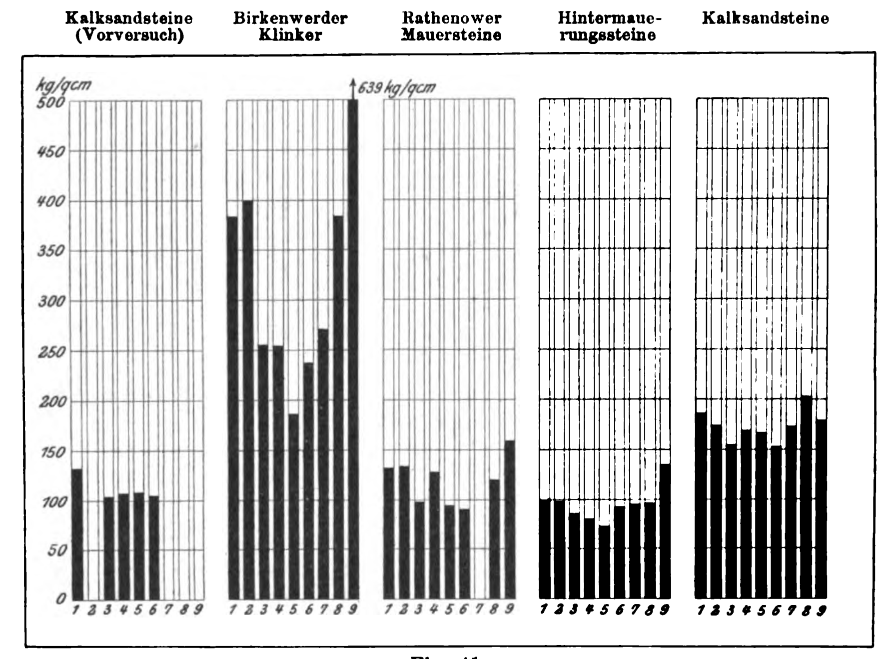


Fig. 41.
Einfluß der Art des Fugenmaterials auf die Festigkeit der Probekörper aus zwei Steinhälften. Ergebnisse der Druckversuche nach Tab. 65.

In der Figur bedeuten die

	Nr. 1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Körper aus je zwei Steinhälften								
die Druckfestigkeit der	zusammengemauert mit			zusammengelegt mit				ohne Fugenfüllung	Würfel aus den Steinen geschnitten
	reinem Zement	Zementmörtel	Kalkmörtel	Zementpulver	trockenem Sand	feuchtem Sand	Sägemehl		

Hier sei eingeschaltet, daß in den nachstehenden Ausführungen — der Einfachheit wegen — bedeutet:

a) Körperfestigkeit: Die Druckfestigkeit der Körper aus zusammengemauerten Steinhälften (σ_{-Bk});
b) Steinfestigkeit: Die Druckfestigkeit, ermittelt an ganzen Steinen (σ_{-Bs});
c) Materialfestigkeit: Die Druckfestigkeit, ermittelt an Materialwürfeln (σ_{-B});
d) Mauerfestigkeit: Die Druckfestigkeit in Verband gemauerter Mauerwerkskörper (σ_{-Bm}).

Zu 1 und 2: Der geringe Grad der Festigkeit der mit Kalkmörtel gemauerten und der mit losem Fugenmaterial aufeinander gelegten Körper gegenüber derjenigen der mit reinem Zement und mit Zementmörtel vermauerten erklärt sich aus der bekannten Wirkung weicher Zwischenlagen zwischen Druckkörper und Druckplatte [1]) oder, wie hier, aus dem Verhalten der teils festen, teils weichen Zwischenlage (Fuge) zwischen zwei gleich festen Druckkörpern (Steinhälften).

Der Unterschied zwischen der Festigkeit der Körper beider Gruppen ist allerdings, wie namentlich die Verhältniszahlen in der Tab. 65 zeigen, zum Teil gering. Am ungünstigsten ist das Verhältnis der Festigkeiten bei den Birkenwerder Klinkern, den Steinen mit der höchsten Festigkeit.

Zu 3: Daß die Körper aus den ohne Fugenfüllung aufeinander gelegten Steinhälften höhere Festigkeit geliefert haben, als die in reinem Zement gemauerten, ist vermutlich auf das bei ersteren günstigere Verhältnis von gedrückter Fläche zur Höhe $\left(\frac{\sqrt{f}}{h}\right)$ zurückzuführen. Durch Abschleifen der einen Fläche jeder Steinhälfte und durch den Fortfall der Fugenmasse wurde die Höhe der ersteren Art Versuchsstücke bei gleichbleibendem Querschnitt geringer, als die der gemauerten Körper.

Zu 4: Auffallend und aller Erwartung widersprechend ist die hohe Festigkeit der Materialwürfel im Vergleich zur Körperfestigkeit. Diese Tatsache war so überraschend und der Unterschied der beiden Festigkeiten insbesondere bei den Birkenwerder Klinkern so groß, daß eine neue Prüfung mit Würfeln aus diesen Steinen ausgeführt wurde. Diese ergab indes sogar, wie aus Tab. 61 (Reihe 2) ersichtlich, noch etwas höhere Werte, als die erste Prüfung, bestätigte also deren Ergebnis.

Der Unterschied zwischen Würfelfestigkeit und Körperfestigkeit ist für die minder festen Steine geringer, als für die festeren.

Während sich z. B. diese beiden Festigkeiten bei den Rathenower Steinen wie 100:122 verhalten, ist dies Verhältnis bei den Birkenwerder Klinkern 100:167.

Die Festigkeit der Körper aus zusammengemauerten Steinhälften wird je nach Art (Festigkeit) des Fugenmaterials günstig oder ungünstig beeinflußt; d. h. minder feste Ziegel, nach dem üblichen Verfahren der Druckfestigkeitsprüfung untersucht, werden gegenüber den festeren begünstigt, festere dagegen von einer gewissen Festigkeitsgrenze ab benachteiligt.

Etwas anders als die gebrannten Tonziegel verhielten sich die Kalksandsteine; bei diesen beträgt das Verhältnis von Körperfestigkeit zu Materialfestigkeit 100:96. Der Grund für dieses abweichende Verhalten konnte zunächst nicht festgestellt werden [2]).

---

1) Martens, Einfluß der Körperform auf die Ergebnisse von Druckversuchen. Mitt. Materialpr.-Amt 1896. S. 133 und Martens, Handbuch der Materialienkunde. 1898. I. S. 111 ff. Verlag von Julius Springer, Berlin.

2) Es war nicht ausgeschlossen, daß die Art der Herstellung der Würfel aus Kalksandsteinen (Schneiden auf der Steinsäge) das Material infolge seines körnigen Gefüges schädlich beeinflußt hat, wenigstens schädlicher, als das der gebrannten Steine, deren Würfel nach dem Schneiden glatte Seitenflächen zeigten, während die der Kalksandsteinwürfel rauh waren. Diese körnige Beschaffenheit des Kalksandsteinmaterials gestaltete auch das Abschleifen der Druckfläche der Kalksandsteinwürfel auf der Schleifscheibe schwierig. Das wenig harte Verkittungsmaterial dieser Steine (Kalkhydrat und kiesel- bezw. kohlensaurer Kalk) wurde hierbei durch das Schleifmaterial (Schmirgel) herausgerissen, während die härteren Quarzkörner stehen blieben und hervorragten, so daß keine völlig glatten Druckflächen zu erzielen waren.



c) Körperfestigkeit und Materialfestigkeit von Ziegel- und Kalksandsteinen.

Um die Zuverlässigkeit der Ergebnisse der Versuche, soweit sie die Feststellung der Körper- und Materialfestigkeit betrafen, nachzuprüfen und um nebst einem zahlenmäßigen Anhalt für die bisher unbekannte Höhe des Einflusses, den die Fuge aus reinem Zement auf die Körperfestigkeit ausübt, ein Urteil über die Beziehungen zwischen den beiden genannten Festigkeitsarten zu gewinnen, wurden weitere umfangreichere vergleichende Festigkeitsversuche mit Körpern aus zusammengemauerten Steinhälften und mit Materialwürfeln ausgeführt, und zwar wurden diese

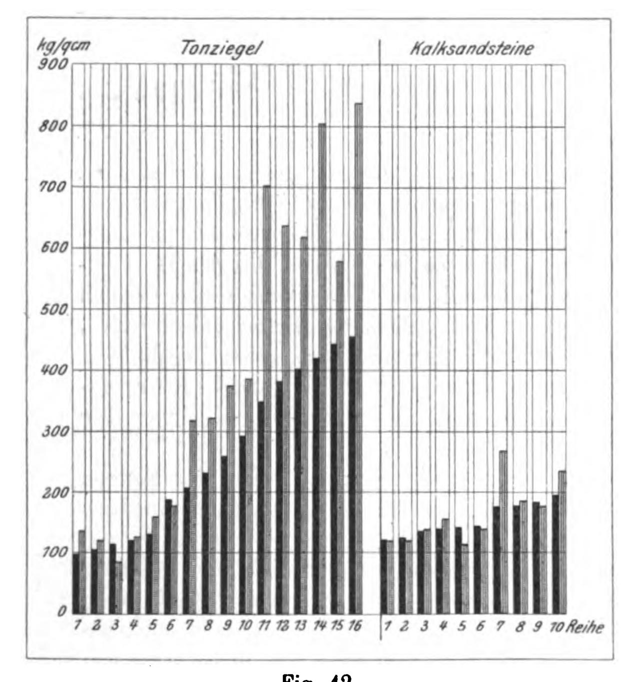


Fig. 42.
Vergleich der Druckfestigkeit von Körpern aus zusammengemauerten Steinhälften und von Materialwürfeln.
Mittelwerte nach Tab. 66 und 67.
▬ Körperfestigkeit. ▭ Materialfestigkeit.

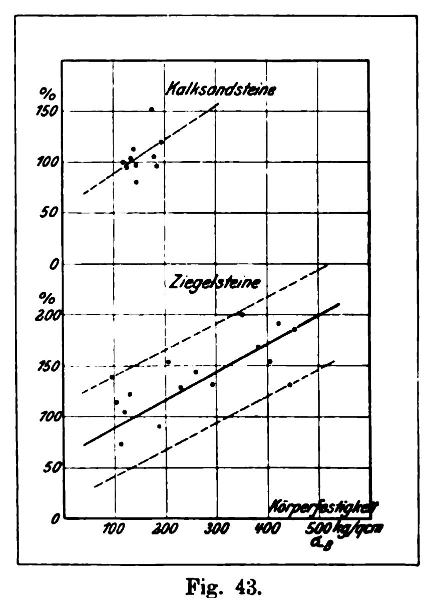


Fig. 43.
Beziehungen zwischen Körperfestigkeit und Materialfestigkeit.
Mittelwerte nach Tab. 66 und 67.

Versuche auf 16 Ziegel- und 10 Kalksandsteinsorten verschiedener Festigkeit ausgedehnt. Wie bei den vorhergehenden Versuchen wurden hierfür 10 Steine jeder Art auf der Steinsäge in zwei Hälften geschnitten, die beiden Hälften mit Mörtel aus reinem Zement aufeinander gemauert und die beiden Druckflächen mit dem gleichen Material abgeglichen.

Ferner wurden aus Steinen jeder Sorte würfelförmige Körper auf der Steinsäge in solcher Größe herausgeschnitten, daß ihre Kantenlänge möglichst gleich der Dicke der ursprünglichen Steine war. Soweit erforderlich, wurden die Druckflächen [1]) der Würfel durch Schleifen geebnet.

[1]) Siehe Fig. 39 und Bemerkung 1. S 115.

Bei dem Schleifen der Kalksandsteinwürfel ergaben sich dieselben Schwierigkeiten wie früher, d. h. das verhältnismäßig weiche Bindemittel wurde durch das Schleifpulver aus dem Materiale herausgearbeitet, während die darin befindlichen harten Quarzkörner weniger abgeschliffen wurden und nachher mehr oder weniger vorstanden [1]).

Sämtliche Probekörper lagerten in einem Raum mit annähernd gleichbleibender Luftwärme und -feuchtigkeit und wurden bei 28 Tagen Alter (der Fuge) der Druckprobe unterzogen.

Die Ergebnisse sind in den Tabellen 66 und 67 auf Seite 124 bis 127 verzeichnet und zur leichteren Übersicht in Fig. 42 und 43 zeichnerisch dargestellt.

Aus ihnen geht hervor:

a) Tonziegel:

Die Druckfestigkeit der Körper aus zusammengemauerten Steinhälften, d. i. die Körperfestigkeit, ist kleiner als die Würfelfestigkeit.

Der Unterschied zwischen beiden Festigkeiten wächst mit Zunahme der Festigkeit der Steine.

Abweichungen von diesem Gesetz kommen vor, sind jedoch in den bei den Tonziegeln bekanntlich vorhandenen Ungleichmäßigkeiten im Material (siehe die großen Schwankungen der Einzelwerte und starken Abweichungen der Mittelwerte von der Ausgleichslinie in Fig. 43) begründet.

b) Kalksandsteine:

Für diese Art Steine gilt scheinbar das gleiche Gesetz; indessen ist das Versuchsmaterial nicht groß genug, um das Gesetz ableiten zu können.

Zahlenmäßig drückt sich das Verhältnis der beiden Festigkeitsarten (Körper- und Materialfestigkeit) durch die errechneten Verhältniszahlen (Tab. 66 und 67) aus. Diese schwanken, wie ersichtlich, bei den Tonziegeln zwischen 70 und 200, bei den Kalksandsteinen zwischen 80 und 150.

Setzt man die Materialfestigkeit = 100, so schwankt das Verhältnis dieser zur Körperfestigkeit bei den Tonziegeln zwischen 50 und 143, bei den Kalksandsteinen zwischen 66 und 125.

Schließlich wird durch die Ergebnisse dieser Versuche die bereits oben festgestellte Tatsache vollauf bestätigt.

---

[1]) Siehe Bemerkung 2. S. 121.

Tab. 66. Vergleich der Körper-

Ergebnisse der Prüfung auf Druckfestigkeit von Körpern

a) Ton-

Reihe	1	2	3	4	5	6	7	8
Ziegelgattung (Farbe)	Hinter- mauerungs- steine (rot)	Hinter- mauerungs- steine II. Kl. (dunkelrot)	Poröse Ziegelsteine (rötlichgelb)	Hinter- mauerungs- steine (rot)	Rathenower Hinter- mauerungs- steine (rot)	Hinter- mauerungs- steine II. Kl. 2 Nr. 3394 d (rot)	Ziegelsteine 2 Nr. 3734 (gelb)	Hinter- mauerungs- steine I. Kl. (blaßrot)
Mittleres Gewicht der lufttrockenen Ziegel	3,548 kg	3,542 kg	2,144 kg	3,417 kg	3,416 kg	3,542 kg	2,841 kg	3,325 kg
Mittlere Abmessungen der Ziegel	25,0 . 12,0 . 6,5 cm	24,5 . 12,0 . 6,5 cm	25,0 . 12,0 . 6,5 cm	24,5 . 12,0 . 6,5 cm	24,5 . 11,7 . 6,2 cm	25,0 . 12,0 . 6,5 cm	25,0 . 12,0 . 6,5 cm	25,0 . 12,0 . 6,5 cm
Versuch Nr.	Bruchlast in kg bei							
	Probekörper aus zusammengemauerten							
Mittlere Abmessung der Versuchsstücke	12,0 . 12,0 . 14,3 cm	11,8 . 12,0 . 15,6 cm	12,1 . 12,0 . 15,1 cm	11,8 . 12,0 . 15,9 cm	11,9 . 11,7 . 14,6 cm	12,1 . 12,0 . 15,4 cm	12,0 . 12,0 . 15,5 cm	12,1 . 12,0 . 15,7 cm
Gedrückte Fläche der Versuchsstücke	144 qcm	142 qcm	145 qcm	142 qcm	139 qcm	145 qcm	144 qcm	145 qcm
1	16 550	11 980	17 950	22 370	15 580	36 130	24 540	36 620
2	18 550	24 780 [1])	23 600	13 670	18 000	18 990	29 130	24 540
3	13 900	11 980	19 900	13 670	22 470	33 480	27 440	30 340
4	13 650	12 220	11 250	17 300	20 480	28 890	25 270	32 270
5	11 100	13 920	13 300	20 680	17 000	18 990	26 960	52 310
6	13 700	12 470	16 100	14 400	18 490	23 580	25 990	38 310
7	14 300	15 370	18 000	15 610	16 060	32 270	36 130	26 960
8	11 650	17 300	11 650	20 920	14 640	31 540	27 440	36 860
9	15 300	17 780	16 150	17 300	19 490	23 330 ·	38 070	27 440
10	10 500	11 020	16 300	14 160	18 990	27 440	35 650	28 890
Mittel	13 920	14 882	16 420	17 008	18 120	27 464	29 662	**33 454**
Mittlere Druckfestigkeit σ_{-B} in kg/qcm	**97**	**105**	**113**	**120**	**130**	**189**	**206**	**231**

Aus den Ziegeln

Reihe	1	2	3	3	4	5	6	7	8
Mittlere Abmessung der Versuchsstücke	6,0 . 6,0 . 6,0 cm	6,2 . 6,2 . 6,2 cm	6,1 . 6,1 . 7,1 cm [2])	6,1 . 6,1 . 6,1 cm [3])	6,2 . 6,2 . 6,3 cm	6,5 . 6,5 . 6,2 cm	6,2 . 6,2 . 6,2 cm	6,4 . 6,4 . 6,4 cm	6,3 . 6,3 . 6,4 cm
Gedrückte Fläche	36,0 qcm	38,4 qcm	37,2 qcm	37,2 qcm	38,4 qcm	42,3 qcm	38,4 qcm	41,0 qcm	39,7 qcm
1	3 600	4 010	3 200	2 200	2 810 [2])	5 500	7 880	15 610	10 290
2	4 900	4 010 [2])	2 350	3 450	5 460	6 800	6 430	12 220	11 740
3	4 800	4 260 [2])	3 600	2 550	2 810 [2])	8 430	5 950	11 020	14 880
4	4 900	4 500	3 000	2 300	3 770	4 850	5 220 [6])	12 950	12 220
5	4 000	6 670 [3])	3 000	3 200	6 430	6 250	5 220	11 980	11 020
6	3 800	4 500	2 350	4 850	8 360	5 810	6 430	13 670	18 750
7	5 950	3 770 [2])	4 200	2 000	3 770	10 110	4 500 [6])	11 260	10 290
8	6 700	4 010	3 150	2 600	6 190	6 000	7 390	10 540	10 050
9	3 300	6 430 [3])	2 200	5 500	3 050 [2])	5 100	5 710	15 370	12 470
10	6 200	4 010	2 250	2 600	5 460	8 000	13 190 [1])	15 370	15 850
Mittel	4 815	4 617	2 930	3 125	4 811	6 685	6 792	12 999	12 756
Mittlere Druckfestigkeit σ_{-B} in kg/qcm	**134**	**120**	**79**	**84**	**125**	**158**	**177**	**317**	**321**

Verhältniszahlen; Festigkeit der Körper

	1	2	3	3	4	5	6	7	8
Mittel	**138**	**114**	**70**	**74**	**104**	**122**	**94**	**154**	**139**

[1]) Dichteres Material.
[2]) Die Seitenflächen zeigten Löcher.
[3]) Die Seitenflächen waren glatt.
[4]) Die Druckflächen waren mit Mörtel abgeglichen.
[5]) Die Druckflächen waren abgeschliffen.
[6]) Riß in der Druckrichtung. Zerstörung an der Rißstelle.



festigkeit und Materialfestigkeit.

aus zusammengemauerten Steinhälften und von Materialwürfeln.

ziegel.

9	10	11	12	13	14	15	16
Ziegelsteine 2 Nr. 3854 a (hellrot bis gelblichrot)	Ziegelsteine 2 Nr. 3854 c (rot bis hellrot)	Klinker 2 Nr. 3854 b (hellrot bis gelblichrot)	Birkenwerder Klinker	Ziegelsteine 2 Nr. 3540 (gelblich)	Ziegelsteine 2 Nr. 3729 (dunkelrot)	Klinker (gelblichgrau)	Klinker 2 Nr. 3854 d (dunkelrot)
3,568 kg	3,578 kg	3,548 kg	3,412 kg	3,244 kg	4,119 kg	3,420 kg	3,515 kg
25,4 . 12,1 . 6,6 cm	24,3 . 11,8 . 6,5 cm	25,5 . 11,9 . 6,5 cm	25,0 . 12,0 . 6,5 cm	24,0 . 11,0 . 6,0 cm	25,5 . 12,5 . 6,8 cm	24,5 . 12,0 . 6,5 cm	23,9 . 11,3 . 6,4 cm

der Zerstörung[7]).

Ziegelhälften (28 Tage alt).

9	10	11	12	13	14	15	16
12,4 . 12,3 . 15,0 cm	11,8 . 11,7 . 14,7 cm	12,1 . 11,9 . 15,0 cm	11,9 . 11,9 . 15,0 cm	11,6 . 11,0 . 14,8 cm	12,3 . 12,5 . 15,8 cm	11,9 . 12,0 . 15,3 cm	11,4 . 11,2 . 14,0 cm
153 qcm	138 qcm	144 qcm	142 qcm	128 qcm	154 qcm	143 qcm	128 qcm
38 550	32 270	57 870	47 240	48 210	55 940	63 420	56 660
28 410	32 750	46 280	63 180	54 010	61 730	77 910	67 530
33 480	30 340	51 590	54 270	50 620	78 160	48 930	60 280
40 960	30 340	36 860	50 140	49 660	68 500	62 940	54 970
47 730	50 620	47 240	55 450	48 690	63 180	61 250	50 620
33 240	42 900	40 720	50 620	54 970	66 080	61 730	67 050
45 310	51 350	42 170	63 180	46 760	66 080	64 150	60 520
46 030	42 410	65 600	49 660	48 690	70 910	51 350	55 210
37 100	50 380	55 450	54 010	54 970	61 250	93 850	40 720
47 000	39 270	60 040	54 970	59 800	55 940	48 690	67 290
39 781	40 263	50 382	54 272	51 638	64 777	63 422	58 085
260	**292**	**350**	**382**	**408**	**421**	**444**	**454**

geschnittene Würfel.

9	10	11	12	13	14	15	16
6,5 . 6,5 . 6,5 cm	6,5 . 6,5 . 6,5 cm	6,5 . 6,5 . 6,5 cm	6,3 . 6,2 . 6,2 cm	6,2 . 6,2 . 6,2 cm	6,7 . 6,7 . 6,7 cm	6,3 . 6,3 . 6,3 cm	6,5 . 6,5 . 6,4 cm
42,3 qcm	42,3 qcm	42,3 qcm	39,0 qcm	38,4 qcm	44,9 qcm	39,7 qcm	42,3 qcm
18 020	13 430	25 030	25 030	23 090	30 340	25 510	49 420
14 400	20 680	31 300	30 340	22 850	40 000	18 260	36 130
15 850	13 430	23 090	20 200	22 850	36 130	30 100	30 340
14 160	17 300	40 720	(17 300)	25 990	27 200	20 680	52 310
14 880	17 540	24 060	32 750	28 410	38 790	20 440	28 410
15 850	14 880	23 330	(12 950)	25 990	38 070	18 750	39 520
13 920	13 430	23 580	23 090	23 090	27 920	18 990	43 860
19 710	15 610	26 710	28 410	22 610	41 200	27 920	34 690
17 300	22 130	39 030	30 820	22 850	41 450	19 230	35 000
14 400	14 880	39 520	28 410	20 440	40 000	30 340	46 000
15 849	16 331	29 637	24 930	23 817	36 110	23 022	35 459
375	**386**	**701**	**639**	**620**	**804**	**580**[8])	**838**

aus zusammengemauerten Steinhälften = 100.

9	10	11	12	13	14	15	16
144	**132**	**200**	**167**	**154**	**191**	**131**	**185**

[7]) Risse und Zerstörung fielen annähernd zusammen.

[8]) Das Material der Würfel war sehr ungleichmäßig.

Tab. 67. b) Kalk

Reihe	1	2	3	4
Herkunft der Kalksandsteine	Kalksandsteine von v. Mashow zu Langeböse. 2 Nr. 3525	Kalksandsteine von der Hartsteinfabrik Wilhelmsfelde 2 Nr. 3394 b	Kalksandsteine von dem Garnison-Baubeamten zu Neuhammer. 2 Nr. 3784	Kalksandsteine von A. Beringer, Charlottenburg 2 Nr. 3713
Farbe und Gefüge	hellgrau, grobkörnig bis Erbsengröße	hellgrau, gleichmäßig körnig	weißlich grau, hauptsächlich feiner Sand	hellgrau, ziemlich feinkörnig
Mittleres Gewicht der lufttrockenen Steine	3,523 kg	3,459 kg	3,642 kg	3,530 kg
Mittlere Abmessungen der Steine	25,0 . 12,0 . 6,5 cm	25,0 . 12,0 . 6,5 cm	25,2 . 12,0 . 6,5 cm	25,0 . 12,0 . 6,5 cm
Versuch Nr.	Bruchlast in kg			
	Probekörper aus zusammengemauerten			
Mittlere Abmessungen der Versuchsstücke	12,1 . 12,0 . 14,5 cm	12,1 . 12,0 . 15,0 cm	12,2 . 12,0 . 15,2 cm	12,1 . 12,0 . 15,2 cm
Gedrückte Fläche der Versuchsstücke	145 qcm	145 qcm	146 qcm	145 qcm
1	17 500	15 400	19 250	23 970
2	17 850	15 700	18 400	21 380
3	16 500	20 250	19 300	24 100
4	16 600	19 000	16 780	19 320
5	18 300	20 700	20 850	17 620
6	18 400	23 950	18 820	17 080
7	19 300	17 650	19 900	21 300
8	17 600	18 400	20 100	22 500
9	17 700	18 000	22 300	15 500
10	14 400	14 200	19 700	20 800
Mittel	17 415	18 325	19 540	20 357
Mittlere Druckfestigkeit σ_{-B} in kg/qcm	**120**	**126**	**134**	**140**
	Aus den Kalksandsteinen			
Mittlere Abmessungen der Versuchsstücke	6,5 . 6,5 . 6,5 cm	6,2 . 6,2 . 6,4 cm	6,5 . 6,5 . 6,5 cm	6,5 . 6,5 . 6,5 cm
Gedrückte Fläche der Versuchsstücke	42,3 qcm	38,4 qcm	42,3 qcm	42,3 qcm
1	5 150	5 000	4 050	6 250
2	6 400	4 800	4 500	7 300
3	4 500	4 400	7 800	6 150
4	4 570	4 400	6 550	6 600
5	4 250	4 350	6 500	6 050
6	4 030	4 950	5 050	6 950
7	5 530	4 700	4 300	6 400
8	5 000	4 300	6 350	6 650
9	5 040	5 250	7 250	7 950
10	5 880	4 100	6 850	6 200
Mittel	5 035	4 625	5 920	6 650
Mittlere Druckfestigkeit σ_{-B} in kg/qcm	**119**	**120**	**140**	**157**
	Verhältniszahlen. Festigkeit der Körper aus den			
Mittel	**99**	**95**	**104**	**112**

s a n d s t e i n e.

5	6	7	8	9	10
Kalksandsteine von der Hartziegelfabrik Bublitz 2 Nr. 3394c	Kalksandsteine von dem Kalksandsteinwerk Flechtingen 2 Nr. 3394a	Kalksandsteine vom Kinler Hartsteinwerk Struve & Co. 2 Nr. 3884	Kalksandsteine von dem Garnison-Baubeamten zu Neuhammer. 2 Nr. 3863	Kalksandsteine	Kalksandsteine von dem Garnison-Baubeamten zu Neuhammer. 2 Nr. 3742
hellgrau, mit Kieseln durchsetzt	hellgrau	hellgrau, fein bis grobkörnig	hellgrau, ziemlich feiner Sand mit vereinzelt groben Stücken	hellgrau	hellgrau, fein bis grobkörnig mit vereinzelten Quarzeinlagen
3,542 kg	3,677 kg	3,148 kg	3,542 kg	3,540 kg	3,754 kg
25,0 . 12,0 . 6,5 cm	25,0 . 12,0 . 6,5 cm	23,0 . 11,0 . 6,7 cm	25,1 . 12,0 . 6,6 cm	25,0 . 12,0 . 6,5 cm	25,5 . 12,0 . 6,5 cm

b e i d e r Z e r s t ö r u n g[1])

Kalksandsteinhälften (28 Tage alt).

5	6	7	8	9	10
12,1 . 12,0 . 14,6 cm	12,2 . 12,0 . 14,9 cm	11,1 . 11,0 . 15,0 cm	12,1 . 12,0 . 14,8 cm	12,0.12,0.15,3cm	12,4 . 12,0 . 15,2 cm
145 qcm	146 qcm	122 qcm	145 qcm	144 qcm	149 qcm
22 700	20 950	17 100	26 350	26 250	37 100
19 550	22 250	21 600	24 550	25 650	41 450
20 200	20 000	20 950	29 600	24 300	23 090
19 900	21 000	18 700	31 750	26 650	20 680
22 100	20 550	26 100	25 300	27 900	21 640
26 400	19 500	24 400	25 200	27 800	19 710
15 250	19 550	21 400	25 750	29 000	39 030
20 350	24 150	23 750	24 700	25 800	40 960
21 250	22 900	19 800	23 300	26 800	22 610
17 900	20 100	22 400	23 650	26 500	23 090
20 560	21 095	21 620	26 015	26 665	28 936
142	**144**	**177**	**179**	**185**	**194**

geschnittene Würfel.

5	6	7	8	9	10
6,3 . 6,3 . 6,3 cm	6,1 . 6,2 . 6,4 cm	6,5 . 6,5 . 6,6 cm	6,5 . 6,5 . 6,5 cm	6,7 . 6,7 . 7,1 cm	6,5 . 6,5 . 6,5 cm
39,7 qcm	37,8 qcm [2])	42,3 qcm	42,3 qcm	45 qcm [3])	42,3 qcm
4 550	5 050	8 550	6 900	7 600	15 200
4 150	4 300	11 450	7 900	8 250	14 100
5 000	4 100	8 900	8 950	7 750	6 850
4 100	7 050	12 700	9 100	8 250	17 150
5 500	4 100	11 150	8 450	7 900	7 250
4 350	6 500	14 250	7 850	7 300	7 050
4 100	5 250	12 200	9 150	8 000	8 750
4 750	4 850	9 050	6 550	7 950	7 200
3 650	6 800	11 850	6 400	7 800	7 250
4 900	5 050	12 700	8 150	9 100	7 600
4 505	5 305	11 280	7 940	7 990	9 840
118	**140**	**267**	**188**	**178**	**233**

z u s a m m e n g e m a u e r t e n S t e i n h ä l f t e n = 100.

5	6	7	8	9	10
80	**97**	**151**	**105**	**96**	**120**

[1]) Risse und Zerstörung fielen annähernd zusammen. — [2]) Das Material der einzelnen Würfel war sehr ungleichmäßig. — [3]) Die Würfel wurden auf einer Druckfläche geschliffen und auf der anderen mit Mörtel abgeglichen.

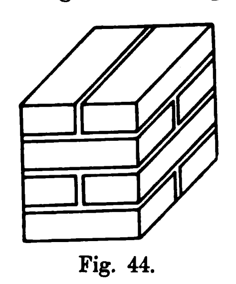
d) Druckfestigkeit von Mauerwerk in Kalkmörtel und Zementmörtel.

Durch die vorbeschriebenen Versuche mit Körpern aus Steinhälften über den Einfluß der Beschaffenheit (Festigkeit) des Fugenmaterials auf die Körperfestigkeit war nachgewiesen, daß letztere durch schlechten Mörtel herabgesetzt wird, und zwar anteilig um so mehr, je höher die Festigkeit des Steinmaterials ist. Es handelte sich nun darum, diesen Einfluß der Mörtelart (Mörtelfestigkeit) und dessen Höhe auch für in Verband errichtete große Mauerwerkskörper und damit die Beziehungen zwischen Körperfestigkeit und Mauerwerksfestigkeit und zwischen Materialfestigkeit und Mauerwerksfestigkeit festzustellen.

Andern Orts ausgeführte Festigkeitsversuche mit Mauerwerk. Bevor auf die zu diesem Zweck im Materialprüfungsamt ausgeführten Versuche eingegangen wird, seien zunächst kurz die Untersuchungen besprochen, die früher und an anderer Stelle zur Ermittelung der Mauerwerksfestigkeit ausgeführt worden sind.

1. Versuche von Böhme.

Die ersten grundlegenden Versuche, die die Feststellung der Mauerwerksfestigkeit im Vergleich zur Druckfestigkeit der verwendeten Ziegel (Steinfestigkeit) und die Ermittelung des Einflusses der Mörtelfestigkeit auf die Mauerwerksfestigkeit bezweckten, sind von Böhme[1]) in der früheren Königlichen Prüfungsstation für Baumaterialien im Jahre 1883 ausgeführt worden. Sie umfaßten mehrere Ziegelgattungen und Mörtelarten. Festgestellt wurde die Druckfestigkeit der Ziegel, der Mörtel und der daraus hergestellten, einen Stein starken und drei Schichten hohen Mauerwerkspfeiler (s. Fig. 44). Die Abmessungen der Pfeiler betrugen im Mittel bei der einen Steinsorte 25 . 25 . 23 cm und bei der anderen 26 . 26 . 24 cm, die gedrückte Fläche im ersteren Falle 625, im letzteren 675 qcm, das Verhältnis $\frac{\sqrt{f}}{h}$ rund 1,08. Die zum Aufmauern der Körper verwendeten Mörtel waren Zementmörtel 1 : 3 und Kalkmörtel 1 : 2. Die Körper wurden bei drei Monaten Alter geprüft.


Fig. 44.

Die Druckfestigkeit der verwendeten Steine wurde abweichend von dem jetzt üblichen Verfahren in der Weise ermittelt, daß die Ziegel in der Form der Anlieferung und ohne jegliche Zurichtung der Druckflächen (Lagerflächen) im lufttrockenen Zustande der Druckprobe unterworfen wurden (nach dem jetzt üblichen Verfahren werden bekanntlich Steine im Normalformat derart für die Druckfestigkeitsprüfung vorbereitet, daß die Steine in zwei Hälften geschnitten, diese mit reinem Zement aufeinander gemauert und die Druckflächen mit fettem Mörtel abgeglichen werden). Die Probestücke (ganze Steine) hatten also weder würfelähnliche Form, wie die jetzt für Druckversuche zugerichteten Körper, noch geebnete Druckflächen, Mängel, durch die die Ergebnisse des Druckversuches in unkontrollierbarem Grade beeinflußt wurden, und zwar einerseits günstig, wegen des bestehenden vorteilhaften Verhältnisses $\frac{\sqrt{f}}{h}$ (das Verhältnis $\frac{\sqrt{f}}{h}$ beträgt für Ziegel im Normal-

[1]) Mitt. Materialpr.-Amt 1884. S. 80 ff.

format $\frac{\sqrt{300}}{6,5}$ = rund 3, während es sich für Versuchskörper, die nach dem neuen Verfahren zugerichtet sind, zu etwa $\frac{\sqrt{144}}{14,8}$ = rund 0,81 stellt), und andererseits ungünstig wegen der Unebenheit der (nicht abgeglichenen) Druckflächen.

Die Versuchsergebnisse sind nebst den Verhältniszahlen, die das Verhältnis der Steinfestigkeit zur Mauerfestigkeit darstellen, in Tab. 68 im Mittel wiedergegeben.

Tab. 68. **Ergebnisse der Prüfung von Ziegelsteinen und von Mauerwerkskörpern in Zement- und Kalkmörtel auf Druckfestigkeit.**

(Versuche von Böhme; Mitt. Materialpr.-Amt 1884.)

Mittlere Abmessungen der Mauerwerkskörper aus:
Herzfelder Ziegeln: 25 . 25 . 23 cm; gedrückte Fläche = 625 qcm (vergl. Fig. 44).
Beneckendorfer Ziegeln: 26 . 26 . 24 cm; gedrückte Fläche = 676 qcm (vergl. Fig. 44).

Alter der Körper: 3 Monate.

Mittelwerte aus je fünf Einzelversuchen.

Steinsorte	Mittlere Druckfestigkeit in kg/qcm der Ziegel	der Mauerwerkskörper in Zementmörtel 1:3 [1])	Kalkmörtel 1:2 [2])
Herzfelder	176	110	77
Beneckendorfer	288	174	127
Verhältniszahlen; Festigkeit der Ziegel = 100			
Herzfelder	100	63	44
Beneckendorfer	100	60	44

[1]) Druckfestigkeit des Mörtels bei 3 Monaten Alter: 211 kg/qcm.
[2]) „ „ „ „ 3 „ „ 12,5 „

Aus ihnen geht hervor, daß

1. die Mauerwerksfestigkeit geringer ist, als die Steinfestigkeit (Verhältnis: $\sigma_{-Bs} : \sigma_{-Bm}$ [Zementmörtel]: σ_{-Bm} [Kalkmörtel] = 100 : 62 : 44);
2. die Mauerwerksfestigkeit durch die Art (Festigkeit) des Mörtels im hohen Grade beeinflußt wird, und zwar um so ungünstiger, je geringer die Festigkeit des Mörtels wird. (Verhältnis σ_{-Bm} [Zementmörtel]: σ_{-Bm} [Kalkmörtel] = 100 : 72).

2. Versuche des Royal Institute of British Architects.

Ein etwas anderes Bild, wenigstens bezüglich des Verhältnisses zwischen Ziegelfestigkeit und Mauerwerksfestigkeit, als die Böhmeschen Versuche, geben die in den Jahren 1895/98 auf Veranlassung des Royal Institute of British

Architects[1]) von Prov. Unwin angestellten Druckversuche mit Mauerwerkskörpern und mit den zu deren Herstellung verwendeten Ziegelsteinen und Mörteln.

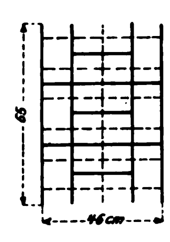


Fig. 45.

Die Versuche erstreckten sich auf fünf Steinsorten und zwei Mörtelarten (Zementmörtel 1 : 4 und Kalkmörtel 1 : 2).

Hergestellt wurden Mauerwerkspfeiler von 69 cm Länge, 46 cm Breite und 183 cm Höhe (gedrückte Fläche im Mittel 3174 qcm; $\frac{\sqrt{f}}{h} = 0,31$). Der Verband, in dem die Pfeiler aufgemauert waren, ist aus Fig. 45 und die Form der Pfeiler aus Fig. 46 ersichtlich.

Die Prüfung der Mauerwerkskörper erfolgte bei fünf Monaten Alter.

Die Ziegel wurden zur Bestimmung ihrer Druckfestigkeit auch in diesem Falle in der Form geprüft, in der sie eingeliefert wurden, d. h. als ganze Steine; jedoch wurden die Druck-(Lager-)-Flächen, wie dies in England Brauch ist, mit einer dünnen Gipsschicht[2]) abgeglichen, beides Umstände, die naturgemäß das Ergebnis der Druckfestigkeitsprüfung der einzelnen Ziegelsteine äußerst günstig beeinflußten. Die Abmessungen des Londoner Ziegelformates sind rund 23 × 11 × 6 cm. Nimmt man an, daß die Höhe der Ziegel nach dem Abgleichen etwa 6,5 cm wurde, so ergibt sich das Verhältnis $\frac{\sqrt{f}}{h}$ zu $\frac{\sqrt{253}}{6,5} = 2,45$ (also weit günstiger als das der Mauerwerkskörper).

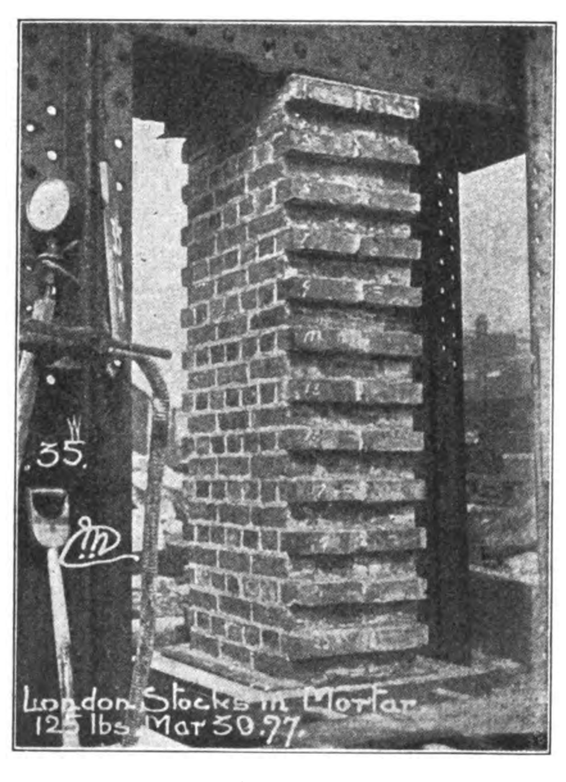


Fig. 46.

Die Durchschnittswerte aus den bei den Druckversuchen mit Ziegeln und Mauerwerkskörpern gewonnenen Ergebnissen sind nebst den Verhältniszahlen in Tabelle 69 enthalten. Aus ihnen geht hervor, daß ähnlich wie bei den Böhmeschen Versuchen:

[1]) Journal of the Royal Institute of British Architects 1896/98; vergl. auch Zeitschr. des Österreichischen Ingenieur- und Architekten-Vereins 1899. Nr. 48 und Tonindustrie-Zeitung 1900. Nr. 1. S. 3 und 1900. Nr. 18. S. 185.

[2]) Aus den mir bekannt gewordenen Berichten über die englischen Versuche war nicht zu entnehmen, wie die Prüfung der Ziegel erfolgte. Ich habe mich daher mit einer entsprechenden Anfrage an Prof. Unwin selbst gewandt, der mir bestätigte, daß die Druckflächen der Ziegel für die Druckfestigkeitsprüfung mit Gips geebnet wurden. Siehe auch Unwin, The Testing of Material of Construction. 1888. Verlag, Longmans, Green & Co., London.

1. die Druckfestigkeit der Steine durch das Vermauern im Verband herabgesetzt wird, und zwar um so mehr, je größer die Ziegelfestigkeit ist (siehe Verhältniszahlen Tab. 69);
2. die Abnahme der Mauerwerksfestigkeit gegenüber der Steinfestigkeit um so größer ist, je minderwertiger der Mörtel ist.

Das Verhältnis der Steinfestigkeit zur Mauerwerksfestigkeit beider Mörtelarten beträgt im Mittel 100 (σ_{-Bs}) : 28 (σ_{-Bm}-Zementmörtel) : 16 (σ_{-Bm}-Kalkmörtel). Das Verhältnis der Mauerwerksfestigkeit stellt sich für beide Mörtelarten im Durchschnitt wie 100 : 57, d. h. die Festigkeit des Mauerwerks in Kalkmörtel ist um rund 50 % geringer, als die des Mauerwerks in Zementmörtel.

Tab. 69. **Ergebnis der Prüfung von Ziegelsteinen und von Mauerwerkskörpern in Zement- und Kalkmörtel auf Druckfestigkeit.**
(Nach dem Bericht des Journal of Royal Institute of British Architects).
Mittlere Abmessungen der Mauerwerkskörper: 69 . 46 . 183 cm; gedrückte Fläche = 3174 qcm (vergl. Fig. 45 u. 46).
Alter der Proben: 5 Monate.
Mittelwerte aus je zwei Einzelversuchen.

Steinsorte	Mittlere Druckfestigkeit in kg/qcm der Ziegel	der Mauerwerkskörper in Zementmörtel 1 : 4[1])	der Mauerwerkskörper in Kalkmörtel 1 : 2[2])	Verhältniszahlen; Festigkeit der Ziegel = 100 Zementmörtel	Verhältniszahlen; Festigkeit der Ziegel = 100 Kalkmörtel
I	90	43	20	48 (100)	22 (44)
II	205	56	34	27 (100)	17 (63)
III	237	61	33	26 (100)	14 (54)
IV	391	90	39	23 (100)	10 (43)
V	841	146	123	17 (100)	15 (88)

[1]) Druckfestigkeit des Mörtels bei 5 Monaten Alter: 48—96 kg/qcm.
[2]) „ „ „ „ 5 „ „ 6—18 „

Daß die Festigkeit der Ziegel gegenüber derjenigen der Mauerpfeiler unverhältnismäßig hoch ausfiel, hat seinen Grund in der bereits erwähnten Maßregel, daß die Steine als ganze Steine geprüft wurden, weshalb sie ein bedeutend günstigeres Verhältnis $\frac{\sqrt{f}}{h}$ erhielten, als die Mauerwerkskörper (2,45 gegen 0,31). Hierzu kommt noch, daß die letzteren nicht, wie bei den Böhmeschen und auch den im Materialprüfungsamt angestellten Versuchen, Würfel- oder doch wenigstens würfelähnliche Form, sondern Pfeilerform hatten, wodurch der Quotient $\frac{\sqrt{f}}{h}$ noch ungünstiger wurde, als in den anderen Fällen (0,31 gegen 1,08 und 0,95). Infolgedessen wurde die Druckfestigkeit der Mauerwerkskörper gegenüber der Steinfestigkeit noch in höherem Grade ungünstig beeinflußt.

Noch mehr als bei den Versuchen von Böhme kommt der Einfluß der Mörtelart auf die Mauerwerksfestigkeit zum Ausdruck, wie aus den vorangegebenen Verhältniszahlen ersichtlich ist.

3. Versuche von Tavernier.

Versuche, die die Ermittelung der Festigkeit von Mauerwerk im allgemeinen und die Feststellung des Einflusses der Fugendicke, sowie der Belastung der Mauerfugen während des Abbindens auf die Mauerwerksfestigkeit im besonderen bezweckten, sind in Frankreich von Tavernier[1]) im Jahre 1897 ausgeführt worden, wie dem Verfasser erst im Jahre 1902 bekannt wurde. Als Probematerial dienten allerdings nicht Ziegelsteine, sondern Bruchsteine (Kalksteine) verschiedener Herkunft. Die zu den Versuchen gefertigten Probestücke waren auch keine eigentlichen in Verband gemauerten Mauerwerkskörper, sondern bestanden nur aus je zwei Würfeln von 6 cm Kantenlänge, die mit den zu prüfenden Mörteln (reiner Zement, Zementmörtel und Kalkmörtel) zusammengemauert waren. Das Verhältnis $\frac{\sqrt{f}}{h}$ der Versuchsstücke betrug rund 0,46.

Die Mittelwerte der bei den Versuchen gewonnenen Ergebnisse sind in Tab. 70 wiedergegeben.

Tavernier faßt seine Beobachtungen und Schlüsse wie folgt zusammen:

1. Die Zerstörung der Mörtelfuge beginnt mit der Zerbröckelung am äußeren Rande; bei Steigerung der Last leeren sich die Fugen mehr und mehr und ihre Dicke verringert sich, noch ehe sich Risse in den Steinen bilden.
2. Die Festigkeit der Mauerkörper ist durchweg beträchtlich höher, als die der Mörtelwürfel, jedoch erheblich niedriger, als die des Steinmörtels (dies gilt natürlich nicht mehr für Steine, die weniger fest sind, als der Mörtel).
3. Die Festigkeit der Mauerkörper mit Kalkmörtel ist beträchtlich geringer, als die derjenigen mit Zementmörtel.
4. Die Mauerwerksfestigkeit nimmt bis zu 84 Tagen mit fortschreitendem Alter der Proben erheblich zu, wenn auch in geringerem Maße, als die Mörtelfestigkeit (ermittelt an Druckproben in Achterform). Zwischen 84 und 180 Tagen ist die Festigkeitszunahme kaum nennenswert.
5. Die Mauerwerksfestigkeit vermindert sich mit zunehmender Fugendicke, wenn auch nicht proportional der Zunahme dieser Dicke, so doch immerhin ziemlich beträchtlich.
6. Die Belastung der Probekörper während des Abbindens steigert deren Festigkeit.

4. Versuche von Camillo Guidi.

Untersuchungen, die in der Ausführung denen von Tavernier angestellten sehr ähneln, sind im Jahre 1904 von Camillo Guidi[2]) im Arsenal von Turin zur vergleichenden Feststellung der Druckfestigkeit von Bruchsteinen und daraus hergestellten Mauerwerkskörpern ausgeführt worden. Sie beziehen sich auf zwei Bruchsteingattungen (Gneiß und Granit), aus denen

1. Würfel von 6 cm Kantenlänge (gedr. Fl. = 36 qcm; $\frac{\sqrt{f}}{h} = 1$),
2. Pfeilerchen von $6 \times 6 \times 19$ cm Kantenlänge (gedr. Fl. = 36 qcm; $\frac{\sqrt{f}}{h} = 0{,}32$) und
3. Pfeiler von $31{,}5 \times 31{,}5 \times 66$ cm Kantenlänge (gedr. Fl. = 1002 qcm; $\frac{\sqrt{f}}{h} = 0{,}48$)

---

[1]) Communications du congrès international des méthodes d'essai des materiaux de construction, contenu à Paris des 9 à 16 Juillet 1900. Bd. 2 und Dümmler, Einfluß der Stärke der Lagerfugen auf die Standfestigkeit des Mauerwerks. Deutsche Töpfer- und Ziegler-Zeitung 1902. Nr. 99. S. 229 ff.

[2]) Die Druckfestigkeit von Steinpfeilern und Gewölben. L'ingegneria civile e le arti industriali 1904. Bd. 29 und Zeitschrift des Österreichischen Ingenieur- und Architekten-Vereins 1904. Nr. 12. S. 189.



Tab. 70. Ergebnisse der Versuche Taverniers.

Probekörper: Je zwei zusammengemauerte Würfel von 6 cm Kantenlänge; h = 13—13,5 cm; gedrückte Fläche = 36 qcm.

Herkunft der Steine	Druckfestigkeit des Steinmaterials kg/qcm	Mauerwerksfestigkeit Spannung in kg/qcm für den Eintritt der ersten Risse [1])									
		Fugendicke	Reiner Zement [2])			Zementmörtel 1 + 3 [2])			Kalkmörtel 1 + 4 [2])		
		cm	28 Tage	84 Tage	180 Tage	28 Tage	84 Tage	180 Tage	28 Tage	84 Tage	180 Tage
Comblanchien, dichter Kalkstein des weißen Jura	1607	1,0	498	637	639	283 (225)	317 (322)	300	85	186	190
		1,5	427	577	617	270	272	290	62 (44)	152 (110)	144
Villebois, schiefergrauer Muschelmarmor bei Lyon	1338	1,0	661	788	—	267 (238)	356 (325)	—	105	114	—
		1,5	371	415	—	240	305	—	73 (35)	80 (67)	—
Grimault, feinkörniger Kalkstein	1164	1,0	573	544	—	277 (190)	389 (332)	—	59	188	—
		1,5	460	562	—	228	291	—	48 (31)	158 (113)	—
Lignerolles, feinkörniger Kalkstein, gering	734	1,0	529	620	—	224 (182)	270 (265)	—	70	171	—
		1,5	524	616	—	188	287	—	56 (35)	139 (109)	—

Verhältniszahlen; Festigkeit des Steinmaterials = 100

Herkunft der Steine	Druckfestigkeit des Steinmaterials	Fugendicke cm	Reiner Zement 28 Tage	Reiner Zement 84 Tage	Reiner Zement 180 Tage	Zementmörtel 28 Tage	Zementmörtel 84 Tage	Zementmörtel 180 Tage	Kalkmörtel 28 Tage	Kalkmörtel 84 Tage	Kalkmörtel 180 Tage
Comblanchien	100	1,0	31	40	40	18	20	19	5	12	12
		1,5	27	36	38	16	17	18	4	9	9
Villebois	100	1,0	49	59	—	20	27	—	8	9	—
		1,5	28	31	—	18	23	—	5	6	—
Grimault	100	1,0	49	47	—	24	34	—	5	16	—
		1,5	40	48	—	20	25	—	4	14	—
Lignerolles	100	1,0	72	84	—	35	37	—	10	23	—
		1,5	71	84	—	26	39	—	8	19	—

¹) Die in Klammern ( ) stehenden Zahlen beziehen sich auf Probekörper, die während des Abbindens unbelastet blieben, während die übrigen Zahlen Probekörper betreffen, die nach der Herstellung mit 1 Atm. belastet wurden.

²) Die Prüfung der Mörtel auf Druckfestigkeit lieferte folgende Werte:

	28 Tage	84 Tage	180 Tage		
Reiner Zement . .	346	480	566	kg/qcm	Der verwendete Zement war Boulogner Portl. Zement, der Sand Normalsand aus Seesand (sable de Leucate), der Kalk der bekannte Wasserkalk Chaux du Teil.
Zementmörtel 1 + 3	95	142	250		
Kalkmörtel 1 + 4	20	41	68		

gefertigt wurden. Die Pfeilerchen bestanden aus je drei Würfeln von 6 cm Kantenlänge, die mit Zementmörtel 1 : 1 aufeinander gemauert waren, die Pfeiler aus Bruchsteinblöcken von 15 × 15 × 31,5 cm, die vier Schichten hoch (66 cm) mit Zementmörtel 1 : 1½ nach Maßgabe der Fig. 47 gemauert waren. Die Druckflächen der Pfeilerchen waren ebenso wie die der Steinwürfel eben geschliffen, während die Druckflächen der größeren Mauerwerkskörper mit Zementmörtel abgeglichen waren. Die Prüfung auf Druckfestigkeit erfolgte bei 3¼—4 Monaten Alter der Proben. Ihre Ergebnisse, die in Tab. 71 als mittlere Werte aus je drei Einzelversuchen wiedergegeben sind, bestätigen, wie ersichtlich, im wesentlichen den Prüfungsbefund der anderen Orts ausgeführten Versuche.

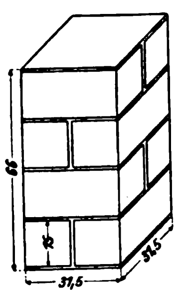


Fig. 47.

Die Druckwerksfestigkeit der gemauerten Probekörper war (um mehr als 50%) geringer, als die Eigenfestigkeit der zu ihrer Herstellung benutzten Bruchsteine.

Tab. 71. **Ergebnisse der Versuche von Camillo Guidi.**
Material- und Mauerwerksfestigkeit von Bruchsteinen.
Mittelwerte aus je drei Einzelversuchen.

Form und Abmessungen der Versuchsstücke	Materialwürfel von von 6 cm Kantenlänge; gedrückte Fläche = 36 qcm; $\frac{\sqrt{f}}{h} = 1$	Pfeilerchen von 6 × 6 × 19 cm [1]); gedrückte Fläche = 36 qcm; $\frac{\sqrt{f}}{h} = 0{,}33$	Pfeiler von 31,5 × 31,5 × 66 cm [2]); gedrückte Fläche = 992 qcm; $\frac{\sqrt{f}}{h} = 0{,}48$
Steinart	Mittlere Druckfestigkeit in kg/qcm (Verhältniszahlen; Würfelfestigkeit = 100).		
Gneiß	1694 (100)	702 (41)	730 (43)
Granit	1367 (100)	607 (44)	826 (60)

Die geringe Festigkeit der Pfeilerchen und Pfeiler gegenüber der Materialfestigkeit ist in diesem Falle nicht allein auf den Einfluß des Verbandes, sondern auch besonders auf das ungünstige Verhältnis $\frac{\sqrt{f}}{h}$ der Mauerwerkskörper gegenüber dem der Würfel (0,32 bezw. 0,48 gegenüber 1) zurückzuführen.

5. Versuche des Materialprüfungsamtes.

A. Zweck der Versuche.

Zweck der Versuche war, wie eingangs dieses Kapitels bereits kurz angedeutet,

[1]) Die Pfeilerchen waren aus je drei Würfeln von 6 cm Kantenlänge in Zementmörtel 1 : 1 aufeinander gemauert. Die Druckflächen waren oben abgeschliffen. Alter bei der Prüfung: 3¼ Monate. Die Zerstörung trat durch Bruch des mittleren Würfels ein.

[2]) Die Pfeiler waren aus Steinen 15 × 15 × 31,5 cm in Zementmörtel 1 : 1,5 aufgemauert. Die Druckflächen waren mit Zementmörtel abgeglichen (siehe Fig. 47). Alter bei der Prüfung: 4 Monate. Die Druckfestigkeit des Mörtels betrug nach 7 Tagen: 360 kg/qcm; nach 28 Tagen: 430 kg/qcm.

1. Ermittelung der Festigkeit von Mauerwerkskörpern aus Ziegel- und Kalksandsteinen im Vergleich zur Körperfestigkeit und Materialfestigkeit der Steine.
2. Feststellung des Verhaltens der Mauerwerkskörper beim Druckversuch. (Zusammendrückung, Austritt des Mörtels aus den Fugen, Rißbildung und Zerstörung.)
3. Ermittelung des Festigkeits-(Erhärtungs-)Fortschrittes von Mauerwerk in Zementmörtel und Kalkmörtel mit zunehmendem Alter.

B. Probematerial.

1. Grundstoffe.

a) Portlandzement, b) Mauersand, c) Kalkmörtel [1]) (aus einem Berliner Mörtelwerk) d) Birkenwerder Klinker, e) Rathenower Mauersteine, f) Kalksandsteine.	Wie bei den Versuchen über den Einfluß der Beschaffenheit des Fugenmaterials auf die Körperfestigkeit (Tab. 60-64).

2. Versuchsstücke.

a) Körper aus zusammengemauerten Steinhälften, b) Würfel, aus den Steinen herausgeschnitten, c) Druckprobekörper (Würfel) aus Zementmörtel 1 : 3 und Kalkmörtel,	Desgl.

d) Mauerwerkskörper in Zementmörtel 1 : 3,
e) Mauerwerkskörper in Kalkmörtel.

C. Umfang der Versuche.

1. Ermittelung der physikalischen Eigenschaften der Steine und der Mörtelstoffe.
2. Bestimmung der Druckfestigkeit
   a) der Steine, ermittelt an Körpern aus zusammengemauerten Steinhälften;
   b) der Steine, ermittelt an herausgeschnittenen Materialwürfeln;
   c) der Mörtel nach 28 und 115 Tagen Lufterhärtung.
3. Prüfung der Mauerwerkskörper auf
   a) Gewicht (Raumgewicht),
   b) Druckfestigkeit
   im lufttrockenen Zustande nach 28 und 115 Tagen Lufterhärtung.

D. Herstellung der Versuchstücke und Versuchsausführung.

Zu B. 2. a) und b). Die Art und Weise der Ausführung der Körper aus zusammengemauerten Steinhälften und der Materialwürfel ist oben bereits beschrieben.

Zu B. 2. c). Die Körper aus den zum Aufmauern der Mauerwerkskörper benutzten Mörteln (Würfel von 7,1 cm Seitenlänge) wurden in der Weise hergestellt, daß der mauergerecht angemachte Mörtel in eiserne Formen gefüllt wurde, die auf geebneten angefeuchteten Ziegelsteinen standen.

Nach beendetem Anziehen (Abbinden) wurde der überstehende Teil des Mörtels entfernt und die Oberfläche des Würfels geglättet. Hierbei wurden die

[1]) Das Verhältnis von Kalkteig zu Sand war, nach dem üblichen Verfahren ermittelt, rund 1 : 2,5 (Raumteile).

Formen in wagerechter Richtung etwas verschoben, um das Haften des Mörtels an dem Stein und etwaiges Beschädigen der Körper beim späteren Abnehmen von den Steinen zu verhüten. Die Körper verblieben drei Tage in der Form und erhärteten im übrigen an der Luft im Zimmer.

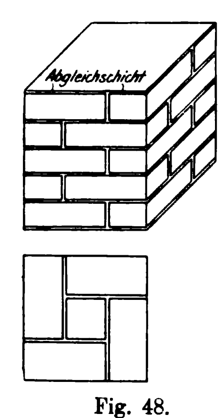


Fig. 48.

Zu B. 2. d) und e). Die Mauerwerkskörper wurden $1^1/_2$ Stein stark und 5 Steinschichten hoch im Schornsteinverband nach Maßgabe der Fig. 48 durch einen geübten Maurer in einem Versuchsraum des Amtes, in dem sie auch bis zum Tage der Prüfung — die Körper in Zementmörtel gemäß dem Gebrauch der Praxis die ersten 5 Tage angenäßt — aufbewahrt wurden. Nach 14 Tagen wurde die obere (Druck-)Fläche mit Zementmörtel 1 : 1 abgeglichen [1]).

Mörtel und Mauerwerkskörper wurden bei 28 und 115 Tagen, die letzteren nach Feststellung ihres Gewichtes, der Druckprobe unterzogen. Die Prüfung erfolgt auf der 500 t-Presse der Abteilung für Metallprüfung.

Bei verschiedenen Laststufen wurde die Zusammendrückung der Mauerwerkskörper festgestellt.

E. Versuchsergebnisse.

Die Ergebnisse sämtlicher Versuche sind in den Tab. 72—79 verzeichnet. Gleichzeitig sind die beobachteten Höhenverminderungen (Tab. 76 und 77) in Fig. 49 und 50 und die mittleren Werte für die Druckfestigkeit der Mauerwerkskörper in Fig. 51 zeichnerisch dargestellt. Die starken Linienzüge beziehen sich auf die Mauerwerkskörper in Zementmörtel, die feinen auf diejenigen in Kalkmörtel.

Tab. 72. **Physikalische Eigenschaften der Mörtelstoffe.**

Mörtelstoff	Gewicht in kg für 1 l			Spezifisches Gewicht s	Dichtigkeitsgrad $\mathfrak{d}$	Undichtigkeitsgrad u	Mahleinheit, Korngröße — Rückstand in % auf den Sieben mit der übergeschriebenen Anzahl Maschen für 1 qcm							
	eingelaufen R_f	eingerüttelt R_r	eingefüllt [4]) R_l				4	9	20	60	120	324	900	5000
Portland-Zement [2])	1,162	1,935	1,240	3,226	0,600	0,400	—	—	—	—	—	0,0	0,2	14,0
Mauersand [3])	1,560	1,843	1,590	2,643	0,697	0,303	0,0	0,4	1,0	4,0	10,0	33,0	—	66,0

Die aus den mittleren Eigengewichten der Mauerwerkskörper berechneten Raumgewichte für 1 cbm Mauerwerk aus den drei Steinsorten und den beiden Mörtel-

[1]) Da die Körper auf ebenen Eisenplatten aufgemauert waren, auf die vor Auflegen der ersten Steinschicht eine Lage fetten Zementmörtels aufgebracht war, war Abgleichen der unteren (Druck-)Fläche nicht erforderlich.

[2]) Raumbeständigkeitsprobe bestanden.
Abbindezeit: 10 Stunden; Erhärtungsanfang nach 5 Stunden.
Normenfestigkeit im Mittel aus je 10 Versuchen nach 7 Tagen, 28 Tagen, 115 Tagen

	7 Tagen	28 Tagen	115 Tagen
Zugfestigkeit:	20,4	25,8	33,4 kg/qcm
Druckfestigkeit:	178	189	286 „

[3]) Mauersand, von einem Berliner Mörtelwerk bezogen; Gehalt an abschlämmbaren Bestandteilen: 0,61 %; Glühverlust: 0,45 %.

[4]) Im 10-l-Gefäß ermittelt.

arten sind einschließlich der Raumgewichte der Körper der weiter unten erwähnten Versuchsreihen in Tab. 79 enthalten.

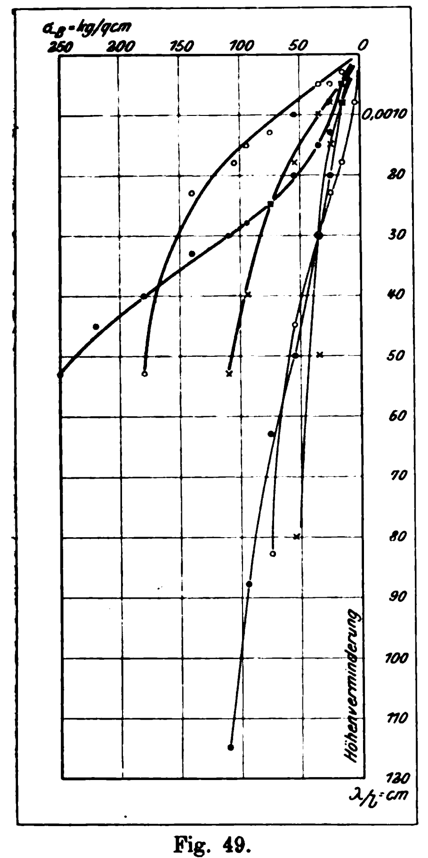


Fig. 49.
Zusammendrückung der 28 Tage alten Mauerwerkskörper nach Tab. 77.
——— Mauerwerk in Zementmörtel.
——— Mauerwerk in Kalkmörtel.
• Birkenwerder Klinker. × Rathenower Mauersteine. o Kalksandsteine.

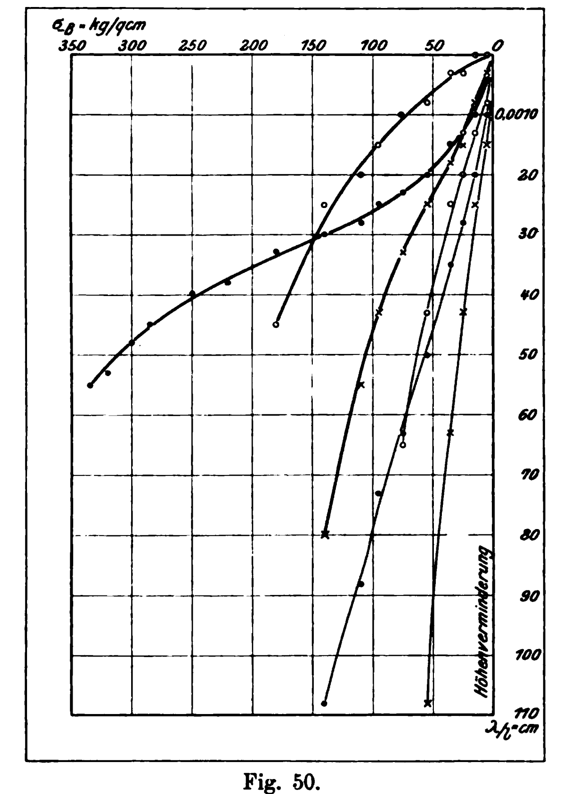


Fig. 50.
Zusammendrückung der 115 Tage alten Mauerwerkskörper nach Tab. 77.
Zeichendeutung wie zu Fig. 49.

Tab. 73. **Physikalische Eigenschaften des Steinmaterials.**

Steinsorte	Bruchflächenbeschaffenheit			Raum-Gewicht r	Spezifisches Gewicht s	Dichtigkeitsgrad d	Undichtigkeitsgrad u
	Gefüge	Bruch	Farbe				
Birkenwerder Klinker	gleichförmig, fein- bis mittelkörnig	unregelmäßig, rauh, scharfkantig	gelb	2,011	2,718	0,740	0,260
Rathenower Mauersteine	ziemlich gleichförmig, fein- bis mittelkörnig	unregelmäßig, rauh, scharfkantig	rot	1,780	2,638	0,675	0,325
Kalksandsteine	gleichförmig, feinkörnig	unregelmäßig, rauh	weißgrau	1,767	2,592	0,682	0,318

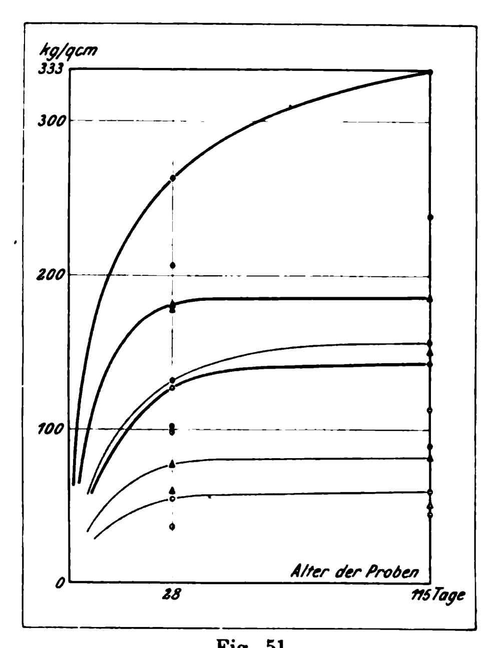


Fig. 51.
Druckfestigkeit der Mauerwerkskörper. Mittelwerte nach Tabelle 78.
Die nicht durch Linien verbundenen Punkte sind die entsprechenden Werte für den Eintritt der ersten Risse.
——— Mauerwerk in Zementmörtel. -- — Mauerwerk in Kalkmörtel.
• Birkenwerder Klinker. o Rathenower Mauersteine. △ Kalksandsteine.

Tab. 74. **Druckfestigkeit der Mörtel.**

Mörtelmischung	1 Gewichtstl. Zement + 3 „ Mauersand		Kalkmörtel, bezogen von einem Berliner Mörtelwerk		Bemerkungen
Versuch Nr.	Druckfestigkeit in kg/qcm nach				
	28 Tagen	115 Tagen	28 Tagen	115 Tagen	
1	148	176	6,2	14,5	Die Körper, die durch Einfüllen des mauergerechten Mörtels in die auf absaugender Unterlage (angefeuchtete Ziegelsteine) stehende Formen hergestellt wurden, verblieben 3 Tage in der Form und erhärteten die übrige Zeit an der Luft im Zimmer.
2	146	174	8,4	13,6	
3	150	184	6,5	13,1	
4	151	184	8,1	14,4	
5	147	180	7,3	14,0	
Mittel	**148**	**180**	**7,8**	**18,9**	
Verhältniszahlen	100	122	100	190	Festigkeit der 28 Tagsproben = 100.
	100	100	4,9	7,7	Festigkeit des Zementmörtels = 100.

Tab. 75. **Druckfestigkeit der Steine.**

Mittelwerte.

	Körperfestigkeit σ_{Bk}	Materialfestigkeit σ_B	
Birkenwerder Klinker	382 kg/qcm	639 kg/qcm	Einzelwerte siehe Tab. 61—64.
Rathenower Mauersteine	130 „	158 „	
Kalksandsteine	185 „	178 „	

Tab. 76. Ergebnisse der Prüfung der Mauerwerkskörper auf Zusammendrückung und Druckfestigkeit.

Mittlere Abmessungen der Versuchsstücke: 38 . 38 . 40 cm; gedrückte Fläche = 1444 qcm, Meßlänge = 40 cm.

Art des Mörtels	Alter der Körper	Versuch Nr.	Zusammendrückung λ in cm, gemessen bei den überschriebenen Belastungen in kg/qcm																Bemerkungen
			5,5	15	25	35	55	75	95	110	140	180	220	250	285	300	320	335	
Birkenwerder Klinker.																			
Zementmörtel	28 Tage	1	0,0	0,4	1,0	1,2	1,4	1,7	1,8	1,9	2,0	2,2	2,2	—	—	—	—	—	Bei 218 t Risse, bei 353 t Bruch.
		2	0,0	0,2	0,3	0,4	0,6	0,7	0,7	0,9	1,0	1,2	1,4	1,6	1,9	—	—	—	„ 358 t „ „ 420 t „
		3	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,7	0,9	1,0	1,3	1,8	2,6	—	—	—	—	„ 316 t „ „ 364 t „
		Mittel	**0,0**	**0,2**	**0,5**	**0,6**	**0,8**	**1,0**	**1,1**	**1,2**	**1,3**	**1,6**	**1,8**	**2,1**	—	—	—	—	—
	115 Tage	1	0,0	0,2	0,3	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	1,1	1,4	1,5	1,7	1,8	—	—	Bei 288 t Risse, bei 441 t Bruch.
		2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,7	0,8	1,0	1,1	1,2	1,3	1,6	1,7	1,8	1,9	2,2	2,4	„ 302 t „ ; bis zum Bruch reichte die 500 t-Presse nicht aus.
		3	0,1	0,5	0,6	0,8	1,0	1,2	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	1,9	2,0	Bei 441 t Risse; bis zum Bruch reichte die 500 t-Presse nicht aus.
		Mittel	**0,1**	**0,4**	**0,5**	**0,6**	**0,8**	**0,9**	**1,0**	**1,1**	**1,2**	**1,3**	**1,5**	**1,6**	**1,8**	**1,9**	**2,1**	**2,2**	—
Kalkmörtel	28 Tage	1	0,0	0,2	0,6	1,1	1,9	2,4	3,9	5,6	—	—	—	—	—	—	—	—	Bei 120 t Risse, bei 180 t Bruch } Mörtel teilweise aus den Fugen gepreßt.
		2	0,0	0,4	1,2	1,6	2,3	3,0	3,6	4,3	5,7	—	—	—	—	—	—	—	Bei 176 t Risse, bei 207 t Bruch
		3	0,0	0,2	0,6	0,9	1,8	2,2	3,0	3,7	—	—	—	—	—	—	—	—	Bei 148 t Risse, bei 187 t Bruch
		Mittel	**0,0**	**0,3**	**0,8**	**1,2**	**2,0**	**2,5**	**3,5**	**4,6**	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	115 Tage	1	0,5	1,0	1,3	1,6	2,2	2,5	3,0	3,4	4,2	—	—	—	—	—	—	—	Bei 92 t Risse, bei 232 t Bruch } Mörtel teilweise aus den Fugen gepreßt.
		2	0,1	0,5	0,7	1,0	1,6	2,2	2,6	3,2	3,9	—	—	—	—	—	—	—	Bei 134 t Risse, bei 243 t Bruch
		3	0,5	1,0	1,3	1,6	2,2	2,7	3,3	3,9	4,9	—	—	—	—	—	—	—	Bei 162 t Risse, bei 204 t Bruch
		Mittel	**0,4**	**0,8**	**1,1**	**1,4**	**2,0**	**2,5**	**2,9**	**3,5**	**4,3**	—	—	—	—	—	—	—	—
Rathenower Mauersteine.																			
Zementmörtel	28 Tage	1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,6	0,9	1,4	2,0	—	—	—	—	—	—	—	—	Bei 148 t Risse, bei 197 t Bruch.
		2	0,0	0,2	0,3	0,4	0,7	1,1	1,6	2,2	—	—	—	—	—	—	—	—	„ 148 t „ „ 176 t „
		3	0,0	0,3	0,5	0,6	0,8	0,9	1,8	2,1	—	—	—	—	—	—	—	—	„ 134 t „ „ 183 t „
		Mittel	**0,0**	**0,2**	**0,3**	**0,4**	**0,7**	**1,0**	**1,6**	**2,1**	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	115 Tage	1	0,0	0,0	0,1	0,2	0,4	0,6	1,2	1,6	2,8	—	—	—	—	—	—	—	Bei 148 t Risse, bei 215 t Bruch.
		2	0,2	0,5	0,7	0,8	1,0	1,4	1,7	2,1	3,3	—	—	—	—	—	—	—	„ 176 t „ „ 201 t „
		3	0,2	0,5	0,9	1,0	1,5	1,9	2,3	2,8	3,8	—	—	—	—	—	—	—	„ 162 t „ „ 201 t „
		Mittel	**0,1**	**0,3**	**0,6**	**0,7**	**1,0**	**1,3**	**1,7**	**2,2**	**3,2**	—	—	—	—	—	—	—	—
Kalkmörtel	28 Tage	1	0,0	0,2	0,9	2,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Bei 57 t Risse, bei 78 t Bruch } Mörtel herausgepreßt; im Inneren mürbe.
		2	0,0	0,4	1,2	2,0	3,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Bei 45 t Risse, bei 78 t Bruch
		3	0,0	0,2	1,0	2,1	3,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Bei 47 t Risse, bei 78 t Bruch
		Mittel	**0,0**	**0,3**	**1,0**	**2,0**	**3,2**	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	115 Tage	1	0,6	1,2	1,8	2,3	3,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Bei 78 t Risse, bei 89 t Bruch } Mörtel aus den Fugen gepreßt, im Inneren mürbe.
		2	0,5	0,7	1,5	2,8	4,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Bei 50 t Risse, bei 85 t Bruch
		3	0,6	1,0	1,8	2,5	4,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Bei 50 t Risse, bei 82 t Bruch
		Mittel	**0,6**	**1,0**	**1,7**	**2,5**	**4,3**	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Tabelle 76 (Fortsetzung).

Art des Mörtels	Alter der Körper	Versuch Nr.	Zusammendrückung λ in cm, gemessen bei den übergeschriebenen Belastungen in kg/qcm 5,5	15	25	35	55	75	95	110	140	180	220	250	285	300	320	335	Bemerkungen
Kalksandsteine.																			
Zementmörtel	28 Tage	1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,7	1,6	—	—	—	—	—	—	Bei 260 t Risse, bei 262 t Bruch.
		2	0,0	0,1	0,3	0,4	0,5	0,7	0,8	0,9	0,9	2,6	—	—	—	—	—	—	„ 257 t „ „ 260 t „
		3	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	1,0	—	—	—	—	—	—	—	„ 251 t „ „ 254 t „
		Mittel	**0,0**	**0,1**	**0,2**	**0,3**	**0,4**	**0,5**	**0,6**	**0,7**	**0,9**	**2,1**	—	—	—	—	—	—	—
	115 Tage	1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,4	0,5	1,0	2,1	—	—	—	—	—	—	Bei 117 t Risse, bei 260 t Bruch.
		2	0,0	0,0	0,1	0,2	0,4	0,5	0,6	0,9	1,1	1,5	—	—	—	—	—	—	„ 278 t „ ; Zerstörung bei Rißbildung.
		3	0,0	0,1	0,1	0,2	0,4	0,5	0,9	0,9	1,0	1,9	—	—	—	—	—	—	„ 253 t „ , bei 274 t Bruch.
		Mittel	**0,0**	**0,0**	**0,1**	**0,1**	**0,3**	**0,4**	**0,6**	**0,8**	**1,0**	**1,8**	—	—	—	—	—	—	—
Kalkmörtel	28 Tage	1	0,5	1,0	1,3	1,6	2,0	3,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Bei 50 t Mörtel aus den Fugen gepreßt: bei 67 t Risse, „ 109 t Bruch.
		2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,7	3,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	bei 92 t Risse, „ 109 t Bruch.
		3	0,0	0,5	0,6	1,0	1,6	3,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	bei 95 t Risse, „ 110 t Bruch.
		Mittel	**0,3**	**0,7**	**0,9**	**1,2**	**1,8**	**3,3**	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	115 Tage	1	0,2	0,5	0,8	1,0	1,8	2,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Bei 99 t Risse, bei 109 t Bruch (Mörtel aus den Fugen herausgepreßt.)
		2	0,2	0,5	0,8	1,0	1,6	2,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Bei 64 t Risse, bei 118 t Bruch (Mörtel aus den Fugen herausgepreßt.)
		3	0,3	0,6	0,9	1,1	1,8	2,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Bei 57 t Risse, bei 113 t Bruch (Mörtel aus den Fugen herausgepreßt.)
		Mittel	**0,2**	**0,5**	**0,8**	**1,0**	**1,7**	**2,6**	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Tab. 77. **Zusammendrückung der Mauerwerkskörper bezogen auf die Längeneinheit nach Tab. 76.** (Vergl. Fig. 49 und 50.)

Mittelwerte aus je drei Einzelversuchen.

Art des Mörtels	Alter der Körper	Zusammendrückung λ/l in cm für die übergeschriebenen Belastungen in kg/qcm 5,5	15	25	35	55	75	95	110	140	180	220	250	285	300	320	335
Birkenwerder Klinker																	
Zementmörtel	**28 Tage**	0	0,0005	0,0013	0,0015	0,0020	0,0025	0,0028	0,0030	0,0033	0,0040	0,0045	0,0053	—	—	—	—
	115 Tage	0	10	13	15	20	23	25	28	30	33	38	40	45	48	53	55
Kalkmörtel	**28 Tage**	0	8	20	30	50	63	88	115	—	—	—	—	—	—	—	—
	115 Tage	0,0010	20	28	35	50	63	73	88	108	—	—	—	—	—	—	—
Rathenower Mauersteine																	
Zementmörtel	**28 Tage**	0	0,0005	0,0008	0,0010	0,0018	0,0025	0,0040	0,0053	—	—	—	—	—	—	—	—
	115 Tage	0,0003	8	15	18	25	33	43	55	80	—	—	—	—	—	—	—
Kalkmörtel	**28 Tage**	0	8	25	50	80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	115 Tage	15	25	43	63	108	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Kalksandsteine																	
Zementmörtel	28 Tage	0	0,0003	0,0005	0,0005	0,0010	0,0013	0,0015	0,0018	0,0023	0,0053	—	—	—	—	—	—
	115 Tage	0	0	3	3	8	10	15	20	25	45	—	—	—	—	—	—
Kalkmörtel	28 Tage	0,0008	18	23	30	45	83	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	115 Tage	8	13	20	25	43	65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Tab. 78. **Ergebnisse der Prüfung der Mauerwerkskörper auf Druckfestigkeit.**
(Siehe Fig. 51.)

Birkenwerder Klinker.

Mittlere Abmessungen: 38.38.40 cm.
Gedrückte Fläche: 1444 qcm.

Versuch Nr.	28 Tage alt			115 Tage alt		
	Gewicht kg	Belastung kg/qcm Rißbildung	Belastung kg/qcm Zerstörung	Gewicht kg	Belastung kg/qcm Rißbildung	Belastung kg/qcm Zerstörung
Zementmörtel						
1	115,7	151	245	123,7	199	306
2	120,0	248	291	118,7	209	mehr als 346
3	115,7	218	252	120,9	306	mehr als 346
Mittel	**117,1**	**206**	**263**	**121,1**	**238**	**333**
Kalkmörtel						
1	114,2	83	125	113,0	64	160
2	111,9	122	143	112,6	93	169
3	109,7	102	129	114,8	112	142
Mittel	**111,9**	**102**	**132**	**113,5**	**89**	**157**

Rathenower Mauersteine.

Mittlere Abmessungen: 38.38.40 cm.
Gedrückte Fläche: 1444 qcm.

Versuch Nr.	28 Tage alt			115 Tage alt		
	Gewicht kg	Belastung kg/qcm Rißbildung	Belastung kg/qcm Zerstörung	Gewicht kg	Belastung kg/qcm Rißbildung	Belastung kg/qcm Zerstörung
Zementmörtel						
1	108,2	102	136	115,5	102	149
2	112,3	102	122	105,6	122	139
3	115,0	93	127	108,0	112	139
Mittel	**111,8**	**99**	**128**	**109,7**	**112**	**142**
Kalkmörtel						
1	109,0	39	54	109,2	54	62
2	108,4	35	54	108,0	35	59
3	110,9	33	54	107,3	35	57
Mittel	**109,4**	**36**	**54**	**108,2**	**41**	**59**

Kalksandsteine.

Mittlere Abmessungen: 38.38.40 cm.
Gedrückte Fläche: 1444 qcm.

Versuch Nr.	28 Tage alt			115 Tage alt		
	Gewicht kg	Belastung kg/qcm Rißbildung	Belastung kg/qcm Zerstörung	Gewicht kg	Belastung kg/qcm Rißbildung	Belastung kg/qcm Zerstörung
Zementmörtel						
1	119,9	180	182	113,0	81	180
2	121,0	178	180	111,8	192	192
3	119,5	174	176	112,3	175	189
Mittel	**120,1**	**177**	**179**	**112,4**	**149**	**187**
Kalkmörtel						
1	114,2	46	75	108,0	68	75
2	113,8	64	75	108,2	44	82
3	113,8	66	77	110,1	40	78
Mittel	**113,9**	**58**	**76**	**108,8**	**51**	**78**

Tab. 79. **Gewicht für 1 cbm Mauerwerk aus verschiedenen Steinen und Mörteln.** (Tab. 78 u. 81).

Mittelwerte aus je drei Einzelversuchen.

Versuchsreihe	Art der Steine	Gewicht für 1 cbm Mauerwerk in kg[1]) in			
		Zementmörtel 1 : 3		Kalkmörtel	
		28 Tage alt	115 Tage alt	28 Tage alt	115 Tage alt
1	Birkenwerder Klinker	2020	2090	1930	1960
5	Gelbe Klinker	1910	—	—	—
6	Rotbraune Klinker	2080	—	—	—
1	Rathenower Mauersteine	1930	1890	1890	1870
1	Kalksandsteine	2070	1940	1970	1880
4	Kalksandsteine	1870	—	—	—
2	Hintermauerungssteine	—	—	1600	—
3	Leichtsteine	—	—	1080	—

Bei den Versuchen mit Mauerwerkskörpern in Zementmörtel trat die Zerstörung ziemlich regelmäßig ein, d. h. unter Bildung der bekannten Pyramidenstumpfe und ohne daß die Fugen vorher sichtbare Veränderungen erlitten.

Bei den Körpern in Kalkmörtel bröckelte schon bei verhältnismäßig niedriger Belastung der Mörtel aus den Fugen, wobei fast gleichzeitig unter beträchtlicher Zusammendrückung der Fugen, bezw. der Körper Bildung regellos durch Stein und Fuge verlaufender Risse beobachtet wurde. Unter der Bruchlast zerfielen die Körper völlig regellos.

Die Art der Zerstörung der Körper in Zementmörtel nach dem Bruch ist aus Fig. 52—54 ersichtlich.

Bevor auf die nähere Besprechung der Ergebnisse der vorbeschriebenen Versuche und der bei diesen gemachten Beobachtungen eingegangen wird, seien im Anschluß hieran zunächst noch die Ergebnisse einiger bei anderer Gelegenheit im Materialprüfungsamt ausgeführten Festigkeitsversuche mit Mauerwerkskörpern aus verschiedenen Steinsorten (teils in Zement-, teils in Kalkmörtel) angefügt.

Diese Prüfungen betrafen:

1. Mauerwerk aus Ziegelsteinen, wie sie vielfach bei Berliner Bauten zur Verwendung gelangen, in gewöhnlichem Kalkmörtel[2]), der von einem Berliner Mörtel-

[1]) Nach dem Deutschen Bauhandbuch 1879. Bd. I. S. 86 und 90 wird das Raumgewicht von Mauerwerk in

Ziegeln zu 1,47—1,70
Sandstein zu 2,05—2,12
Bruchstein zu 2,40—2,46

angenommen, das Gewicht eines Kubikmeters frischen Mauerwerks zu 2400—2460 kg. Das Gewicht für 1 cbm Mauerwerk aus Kalksandsteinen in Kalkmörtel ist für statische Berechnungen zu 1900 kg anzunehmen. (Vorschrift des kgl. Polizei-Präsidiums zu Berlin; vergl. Bauhandbuch 1903. S. 364.) Mit Erlaß vom 4. März 1907 hat der Minister der öffentlichen Arbeiten entschieden, daß für Mauerwerk aus Kalksandsteinen in der Regel kein größeres Einheitsgewicht angenommen wird, als für solches aus Ziegeln (vergleiche Burchartz, Die Prüfung und Eigenschaften der Kalksandsteine. 1908. Verlag von Julius Springer, Berlin).

[2]) Die Prüfung des frischen Mörtels auf mechanische Zusammensetzung ergab normales Mischungsverhältnis (Verhältnis von Kalkteig zu Mauersand nach Raumteilen rund 1 : 2,5). Bei der Druckprobe der Mauerwerkskörper nach 28 Tagen war der Kalkmörtel der äußeren Beschaffenheit nach normal erhärtet.

werk fertig angeliefert war. (Mauerwerkskörper in Schornsteinverband $1^1/_2 \times 1^1/_2$ Stein stark und fünf Schichten hoch nach Fig. 48 aufgemauert; Fugendicke etwa $1^1/_2$ cm). Außer der Druckfestigkeit der Mauerkörper (28 Tage) wurde auch die der verwendeten Ziegel in der üblichen Weise festgestellt. (Reihe 2.)

2. Mauerwerk aus sogenannten Leichtsteinen [1]) in gewöhnlichem Kalkmörtel (in Schornsteinverband $1^1/_2 \times 1^1/_2$ Stein stark und fünf Schichten hoch aufgemauert; Fugendicke etwa $1^1/_2$ cm). Außer der Mauerwerksfestigkeit (28 Tage) wurde die Körperfestigkeit und Materialfestigkeit der verwendeten Steine ermittelt. (Reihe 3.)

3. Mauerwerk aus Kalksandsteinen in Zementmörtel 1 : 3 (in Schornsteinverband $1^1/_2 \times 1^1/_2$ Stein stark und fünf Schichten hoch aufgemauert; Fugen-



Fig. 52.
Birkenwerder Klinker.



Fig. 53.
Rathenower Mauerstein.



Fig. 54.
Kalksandsteine.
Zerstörte Mauerwerkskörper in Zementmörtel.

dicke 1—$1^1/_2$ cm). Festgestellt wurde außer der Mauerwerksfestigkeit (28 Tage) die Körperfestigkeit der Kalksandsteine. (Reihe 4.)

4. Mauerwerk aus
   a) gelben Klinkern,
   b) rotbraunen Klinkern

in Zementmörtel 1 : 2 (in Schornsteinverband $1^1/_2 \times 1^1/_2$ Stein stark und fünf Schichten hoch aufgemauert; Fugendicke 1—$1^1/_2$ cm). Festgestellt wurde außer der Mauerwerksfestigkeit (28 Tage) die Körperfestigkeit und Materialfestigkeit der Steine. (Reihe 5 u. 6.)

---

[1]) Die Leichtsteine waren aus Zement und Lokomotivlösche in Normalformat hergestellt.



Die Ergebnisse dieser sechs Versuchsreihen sind in Tab. 81 verzeichnet; die Werte für die Körper- und Materialfestigkeit sind Mittel aus je zehn Einzelversuchen. Aus den Tabellen sind auch alle näheren Angaben bezüglich der Abmessungen der Steine und Versuchsstücke, des Alters der Proben bei der Prüfung, der Erhärtungsart usw. ersichtlich. Tab. 80 enthält die bei den Versuchsreihen 2 und 3 beobachteten Zusammendrückungen der Mauerwerkskörper.

Tab. 80. **Zusammendrückung (Höhenverminderung) der Mauerwerkskörper der Reihe 2 und 3 zu Tab. 81.**

Versuch Nr.	Zusammendrückung in mm, gemessen bei den übergeschriebenen Belastungen in kg; Meßlänge = 400 mm										Bemerkungen
	3000	6000	8000	10 000	15 000	20 000	25 000	30 000	35 000	40 000	
Tonziegel (Hintermauerungssteine).											
1	0,0	—	0,1	0,2	0,4	0,7	1,1	1,3	1,9	2,4	Bei 25000 kg Risse in einzelnen Stoßfugen; bei 30000 kg Mörtel bröckelt aus den Fugen; bei 35170 kg Risse in einzelnen Steinen; bei 40000 kg Mörtel drückt sich aus den Fugen; bei 44830 kg Bruch.
2	0,0	—	0,4	0,6	0,9	1,4	1,9	2,3	2,7	3,0	Bei 20200 kg Risse in Stoßfugen u. einzelnen Steinen; bei 35000 kg Mörtel bröckelt aus den Fugen, weitere Risse; bei 42900 kg Bruch.
3	0,0	—	0,2	0,3	0,6	1,0	1,4	2,0	2,4	3,0	Bei 20000 kg Risse in Stoßfugen; bei 25030 kg Risse in Steinen, bei 30000 kg weitere Risse in den Steinen; bei 42810 kg Bruch.
Mittel	**0,0**	—	**0,2**	**0,4**	**0,6**	**1,0**	**1,5**	**1,9**	**2,3**	**2,8**	—
Zusammendrückung λ/l	**0,0** (0,0)	— —	**0,0005** (0,33)	**0,0010** (0,67)	**0,0015** (1,0)	**0,0025** (1,67)	**0,0035** (2,50)	**0,0048** (3,17)	**0,0058** (3,83)	**0,0070** (4,67)	Die in Klammern stehenden Zahlen bedeuten die Zusammendrückung in %, bezogen auf die gesamte Dicke der Lagerfugen (rund 6 cm).
Zement- (Leicht-)Steine.											
1	—	0,2	—	0,5	—	0,7	—	1,3	34 500 (2,2)	—	Bei 13000 kg Mörtel bröckelt aus den Fugen; bei 20200 kg Risse durch Steine und Fugen; bei 34500 kg Bruch.
2	—	0,2	—	0,7	—	1,2	—	1,8	3,7	—	Bei 20200 kg Mörtel bröckelt aus den Fugen; bei 27300 kg Risse; bei 34500 kg Bruch.
3	—	0,2	—	0,6	—	1,4	—	27 300 (2,6)	—	—	Bei 20200 kg Risse in den Fugen; bei 23700 kg Bruch.
Mittel	—	**0,2**	—	**0,6**	—	**1,1**	—	**1,6**	—	—	—
Zusammendrückung λ/l	—	**0,0005** (0,5)	—	**0,0015** (1,3)	—	**0,0028** (2,8)	—	**0,0040** (4,0)	—	—	Die in Klammern stehenden Zahlen bedeuten die Zusammendrückung in %, bezogen auf die gesamte Dicke der Lagerfugen (rund 6 cm.

Aus den Versuchszahlen sämtlicher in Frage kommenden Prüfungen und den sonst bei der Versuchsausführung gemachten Beobachtungen lassen sich die im folgenden angegebenen Schlüsse ziehen, die unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Böhmeschen, Londoner und Taverniersch en Versuche in nachstehender Reihenfolge besprochen seien:

1. Verhalten der Mauerwerkskörper beim Druckversuch (Zusammendrückung, Verhalten des Mörtels, Rißbildung, Zerstörung).

2. Einfluß der Fugendicke auf die Mauerwerksfestigkeit.

3. Einfluß der Steinart auf die Mauerwerksfestigkeit.

4. Einfluß der Mörtelart auf die Mauerwerksfestigkeit.

5. Beziehungen zwischen Körper- bezw. Materialfestigkeit und Mauerwerksfestigkeit.

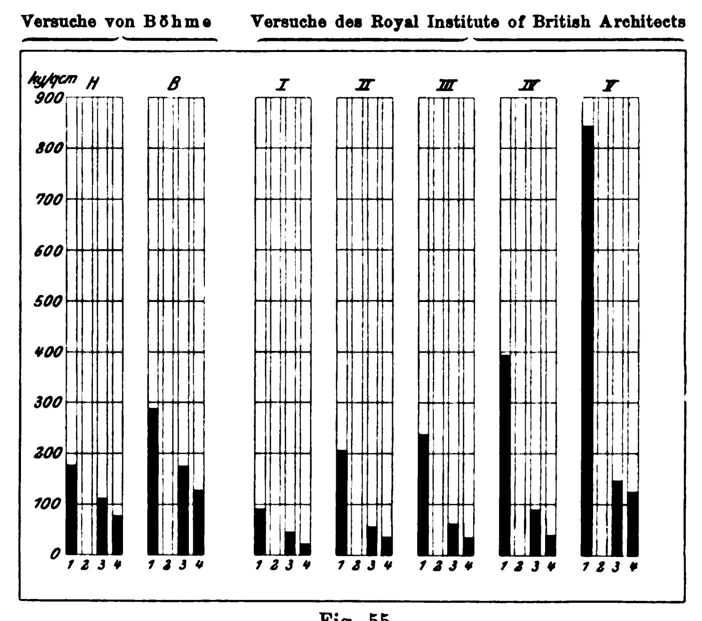


Fig. 55.
Vergleich der Körper-, Material- und Mauerwerksfestigkeit.
Mittelwerte nach Tab. 68 und 69.
1 Körper- oder Steinfestigkeit. *2* Materialfestigkeit. *3* Mauerwerksfestigkeit für Zementmörtel. *4* Mauerwerksfestigkeit für Kalkmörtel.

6. Einfluß des Alters auf die Mauerwerksfestigkeit.

7. Nutzanwendung der Versuchsergebnisse für die Praxis.

8. Beziehungen zwischen Haftfestigkeit des Mörtels am Stein, Scherfestigkeit des Mörtels und Mauerwerksfestigkeit.

Um die gewonnenen Versuchsziffern und die daraus hervorgehenden Beziehungen zwischen Körper-, Material-, Mörtel- und Mauerwerksfestigkeit zur besseren Anschauung zu bringen, sind die Durchschnittswerte sämtlicher in der Abteilung für Baumaterialprüfung ausgeführten Versuche mit Mauerwerk und den zu dessen Herstellung verwendeten Steinen, nach steigender Körperfestigkeit der geprüften Steinsorten geordnet, in Tab. 82 zusammengefaßt und gleichzeitig nebst den mittleren Ergebnissen der Böhmeschen und Londoner Versuche (Tab. 68 und 69) in Fig. 55 und 56 zeichnerisch aufgetragen. In diesen Figuren bedeuten die Nummern

1 = Körperfestigkeit oder Steinfestigkeit[1]),
2 = Material-(Würfel-)festigkeit,
3 = Mauerwerksfestigkeit für Zementmörtel,
4 = Mauerwerksfestigkeit für Kalkmörtel.

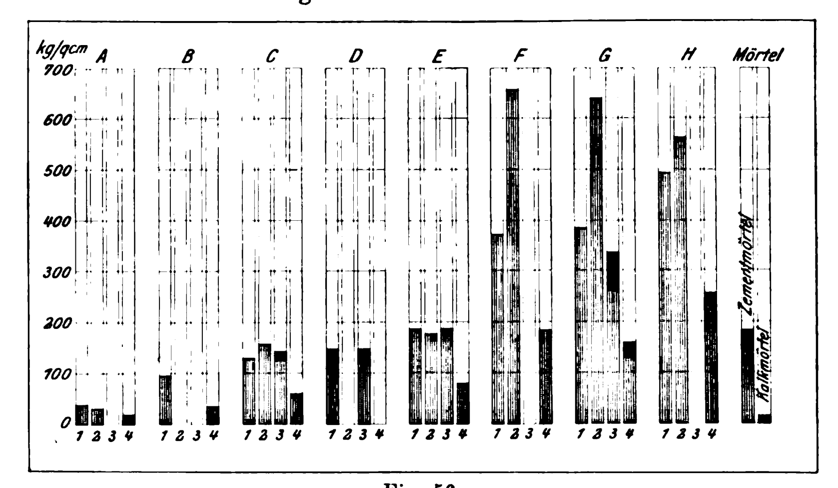


Fig. 56.
Vergleich der Körper-, Material- und Mauerwerksfestigkeit.
Werte nach Tab. 82. Im Materialprüfungsamt ausgeführte Versuche.
Zeichendeutung wie zu Fig. 55. ||||| 28 Tage alte, ■ 115 Tage alte Probekörper.

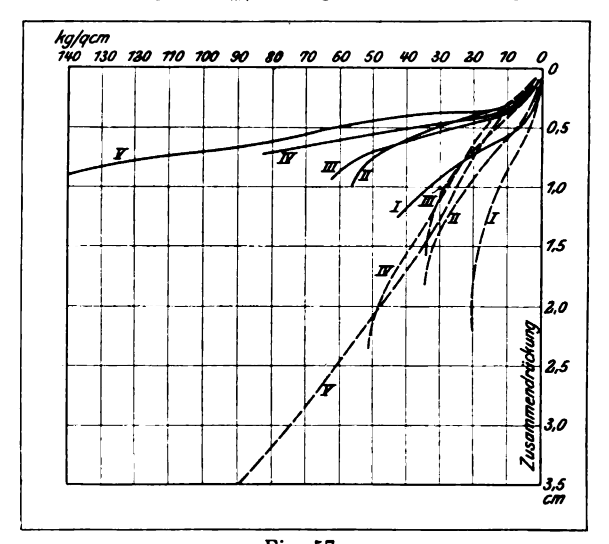


Fig. 57.
Zusammendrückung der Mauerwerkskörper (nach den Londoner Versuchen).
——— Mauerwerk in Zementmörtel. - - - - Mauerwerk in Kalkmörtel.

Zu 1. Verhalten der Mauerwerkskörper beim Druckversuch.

a) Zusammendrückung.

Die Zusammendrückung der Mauerwerkskörper (Höhenverminderung von Stein und Mörtel) ist bei Mauerwerk in Kalkmörtel erheblich größer, als bei solchen

[1]) Es muß ein Unterschied zwischen Körperfestigkeit und Steinfestigkeit gemacht werden, da Böhme und Unwin die Festigkeit der Ziegel an ganzen Steinen (Steinfestigkeit) festgestellt haben, während in der Abteilung für Baumaterialprüfung die Festigkeit der Steine an Körpern aus zwei Steinhälften (Körperfestigkeit) ermittelt worden ist.

in Zementmörtel; dabei ist die Steinart von geringem Einfluß auf das Maß der Längenänderung. Das in dieser Beziehung günstige Verhalten der Mauerwerkskörper aus Kalksandsteinen ist wohl darauf zurückzuführen, daß diese Steine regelmäßigere Form und ebenere Lagerflächen haben, als die Ziegelsteine, wodurch eine gleichmäßigere Dicke der Fuge und infolge dessen eine gleichmäßigere Spannungsverteilung beim Belasten gewährleistet wird.

Der Grad der Längenänderung bei verschiedenen Laststufen ist aus den Zahlen in Tab. 83 ersichtlich, in der die Zusammendrückungen in Prozenten der Gesamtdicke der Lagerfugen berechnet sind (unter Vernachlässigung der Zusammendrückung der Steine).

Tab. 81. **Mauerwerks-, Körper- und Würfelfestigkeit von Ziegelsteinen, Zement- (Leicht-)Steinen und Kalksandsteinen.**

Sämtliche Versuchsstücke lagerten nach der Herstellung bezw. nach dem Schneiden oder Vermauern und Abgleichen in dem gleichen Raume an der Luft. Die Prüfung erfolgte bei 28 Tagen Alter.

Reihe	2		3		4		5		6	
Art und mittlere Abmessungen der Steine	Tonziegel (Hintermauerungssteine); 25,5 . 12,0 . 6,5 cm		Zement- (Leicht-) Steine [1]; 24,0 . 12,0 . 7,1 cm		Kalksandsteine; 22,8 . 10,5 . 6,5 cm		Gelbe Klinker; 24,1 . 11,5 . 6,3 cm		Rotbraune Klinker; 24,8 . 12,0 . 6,8 cm	
Mörtelart	Kalkmörtel				Zementmörtel 1 : 3		Zementmörtel 1 : 2			
Abmessungen und Querschnitt der Mauerwerkskörper (vergl. Fig. 44)	37,5 . 37,5 . 40,0 cm; $1^1/_2 . 1^1/_2$ Stein stark, 6 Schichten hoch. f = 1406 qcm [2]		49,7 . 37,5 . 48,1 cm; $2 . 1^1/_2$ Stein stark, 7 Schichten hoch. f = 1864 qcm [3]		33,5 . 33,5 . 37,0 cm; $1^1/_2 . 1^1/_2$ Stein stark, 5 Schichten hoch. f = 1122 qcm [4]		38,0 . 38,0 . 39,0 cm; $1^1/_2 . 1^1/_2$ Stein stark, 5 Schichten hoch. f = 1444 qcm [5]		38,0 . 38,0 . 39,5 cm; $1^1/_2 . 1^1/_2$ Stein stark, 5 Schichten hoch. f = 1444 qcm [6]	
Versuch Nr.	Druckfestigkeit (Mauerwerksfestigkeit) σ_{-B} in kg/qcm									
	Rißbildung	Zerstörung	Rißbildung	Zerstörung	Rißbildung	Zerstörung	Rißbildung	Zerstörung	Rißbildung	Zerstörung
1	25	32	11	19	Rissbildung und Zerstörung fielen annähernd zusammen	143	184	190	179	218
2	14	31	15	19		150	128	164	161	274
3	17	35	11	13		150	121	184	178	258
Mittel	**19**	**32**	**12**	**17**	—	**148**	**144**	**179**	**173**	**250**
Mittlere Körperfestigkeit σ_{-Bk} in kg/qcm	Rißbildung und Zerstörung fielen zusammen	95 [7]	Rißbildung und Zerstörung fielen annähernd zusammen	35 [8]	Rißbildung und Zerstörung fielen zusammen	147 [9]	Rißbildung und Zerstörung fielen zusammen	369 [10]	Rißbildung und Zerstörung fielen zusammen	494 [11]
Mittlere Materialfestigkeit σ_{-B} in kg/qcm	—	—	desgl.	29 [12]	—	—	desgl.	655 [13]	desgl.	558 [14]

1) Hergestellt aus Zement und Lokomotivlösche.
2) Mittl. Gewicht d. Körper bei 28 Tagen: 90,0 kg; 1 cbm Mauerwerk wiegt hiernach 1600 kg.
3) „ „ „ „ „ 28 „ 96,7 „ 1 „ „ „ „ 1080 „
4) „ „ „ „ „ 28 „ 77,5 „ 1 „ „ „ „ 1870 „
5) „ „ „ „ „ 28 „ 108,8 „ 1 „ „ „ „ 1910 „
6) „ „ „ „ „ 28 „ 118,5 „ 1 „ „ „ „ 2085 „
7) Abmessungen der Versuchsstücke 12,2 . 12,0 . 15,0 cm; gedrückte Fläche 146 qcm.
8) „ „ „ 11,7 . 12,0 . 15,6 „ „ „ 140 „
9) „ „ „ 10,5 . 10,5 . 14,5 „ „ „ 110 „
10) „ „ „ 11,5 . 11,3 . 13,8 „ „ „ 130 „
11) „ „ „ 11,9 . 11,9 . 14,5 „ „ „ 142 „
12) „ „ „ 7,3 . 7,4 . 7,2 „ „ „ 54,0 „
13) „ „ „ 5,1 . 5,1 . 5,2 „ „ „ 26,0 „
14) „ „ „ 6,3 . 6,3 . 6,5 „ „ „ 39,7 „

Zusammendrückung der Probekörper ist auch, wie bereits oben erwähnt, bei den englischen und Taverni erschen Versuchen beobachtet worden. (Böhme hat über diese Erscheinung nicht berichtet.) Bei den englischen Versuchen ist erhebliche Höhenverminderung auch bei den Mauerwerkskörpern in Zementmörtel festgestellt worden (s. Fig. 57), was jedenfalls auf die geringe Festigkeit des verwendeten Mörtels (1 : 4) zurückzuführen ist.

Tab. 82. Zusammenstellung der Mittelwerte für Körper-, Material- und Mauerwerksfestigkeit nach Tab. 65, 78 und 81.

(Siehe Fig. 56.)

Steinsorte		Körperfestigkeit σ_{Bk}	Materialfestigkeit σ_{B}	Mauerwerksfestigkeit σ_{Bm}							
				Zementmörtel				Kalkmörtel			
				28 Tage		115 Tage		28 Tage		115 Tage	
				Risse	Zerstörung	Risse	Zerstörung	Risse	Zerstörung	Risse	Zerstörung
Mittlere Druckfestigkeit in kg/qcm											
Zement-(Leicht-)steine	A	35	29 geschätzt	—	—	—	—	12	17	—	—
Hintermauerungssteine	B	95	(90)	—	—	—	—	19	32	—	—
Rathenower Steine	C	139	158	99	128	112	142	36	54	41	59
Kalksandsteine	D	147	—	148	148	—	—	—	—	—	—
Kalksandsteine	E	185	178	177	179	(149)[2]	187	58	76	51	78
Gelbe Klinker	F	369	655	144[1]	178[1]	—	—	—	—	—	—
Birkenwerder Klinker	G	382	639	206	263	238	mehr als 333	102	132	89	157
Rotbraune Klinker	H	494	558	173[1]	250[1]	—	—	—	—	—	—
Verhältniszahlen; Körperfestigkeit = 100.											
A		100	80	—	—	—	—	34	49	—	—
B		100	(95)	—	—	—	—	20	34	—	—
C		100	122	76	93	86	109	28	42	32	45
D		100	—	100	100	—	—	—	—	—	—
E		100	96	96	97	81	101	31	41	28	42
F		100	178	39	48	—	—	—	—	—	—
G		100	167	54	69	62	87	27	35	23	41
H		100	113	35	51	—	—	—	—	—	—
Verhältniszahlen; Materialfestigkeit = 100.											
A		125	100	—	—	—	—	43	61	—	—
C		82	100	63	81	51	90	23	34	26	31
E		105	100	100	100	84	105	33	43	29	44
F		56	100	22	27	—	—	—	—	—	—
G		60	100	32	41	37	52	16	21	14	25
H		89	100	31	45	—	—	—	—	—	—

1) Vermutlich schlechter Zement.
2) Beobachtungsfehler.

Tab. 83. Zusammendrückung des Mörtels in den Fugen der Mauerwerkskörper, bezogen auf die gesamte Dicke[1]) der Lagerfugen (unter Vernachlässigung der Zusammendrückung der Steine).

Berechnet nach den Werten in Tab. 77.

Art des Mörtels	Alter der Körper	Höhenverminderung in % der gesamten Dicke der Lagerfugen bei den überschriebenen Belastungen in kg/qcm															
		5,5	15	25	35	55	75	95	110	140	180	220	250	285	300	320	335
Rathenower Mauersteine																	
Zementmörtel	28 Tage	0,00	0,33	0,50	0,67	1,17	1,67	2,67	3,50	—	—	—	—	—	—	—	—
	115 Tage	0,17	0,50	1,00	1,17	1,67	2,17	2,83	3,67	(5,33)	—	—	—	—	—	—	—
Kalkmörtel	28 Tage	0,00	0,50	1,67	3,33	(7,67)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	115 Tage	1,00	1,67	2,83	4,17	(7,17)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Birkenwerder Klinker																	
Zementmörtel	28 Tage	0,00	0,33	0,83	1,00	1,33	1,67	1,83	2,00	2,17	2,67	3,00	3,50	—	—	—	—
	115 Tage	0,17	0,67	0,83	1,00	1,33	1,50	1,67	1,83	2,00	2,17	2,50	2,67	3,00	3,17	3,50	3,67
Kalkmörtel	28 Tage	0,00	0,50	1,33	2,00	3,33	4,17	5,83	(7,67)	—	—	—	—	—	—	—	—
	115 Tage	0,67	1,33	1,83	2,33	3,33	4,17	4,83	5,83	(7,17)	—	—	—	—	—	—	—
Kalksandsteine																	
Zementmörtel	28 Tage	0,00	0,17	0,33	0,33	0,67	0,83	1,00	1,17	1,50	3,50	—	—	—	—	—	—
	115 Tage	0,00	0,00	0,17	0,17	0,50	0,67	1,00	1,33	1,67	3,00	—	—	—	—	—	—
Kalkmörtel	28 Tage	0,50	1,17	1,50	2,00	3,00	(5,50)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	115 Tage	0,33	0,83	1,33	1,67	2,83	4,33	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Auch v. Emperger, der die englischen Versuche in der Zeitschrift des Österreichischen Ingenieur- und Architekten-Vereins (Jahrg. 1899 Nr. 48) bespricht, weist darauf hin, daß die bei diesen Versuchen beobachtete Höhenverminderung hauptsächlich von der Mörtelfuge herrührte.

b) Austritt des Mörtels aus den Fugen.

Gleichzeitig mit der Verkürzung der Körper unter steigender Belastung trat, besonders bei den Mauerwerkskörpern in Kalkmörtel, Herausquellen des Mörtels aus den Fugen ein. Diese Erscheinung ist bei sämtlichen Versuchen mit Körpern in Kalkmörtel übereinstimmend beobachtet worden; die gleiche Erscheinung ist auch bei den englischen Versuchen bemerkt worden, und zwar auch bei den Körpern in Zementmörtel.

[1]) Die Körper hatten je vier Lagerfugen, deren Dicke annähernd je etwa 1,5 cm, insgesamt also 6 cm betrug.



v. Emperger tritt im Hinblick auf die bei letztgenannten Versuchen gemachten Beobachtungen der vielfach herrschenden Anschauung entgegen, daß Mörtelfugen unzusammendrückbar seien, und folgert aus dem Verhalten der Probekörper (frühzeitige Rißbildung und Austritt des Mörtels aus den Fugen) ganz richtig, daß die Mörtelfugen zermalmt gewesen sein müssen, lange bevor der völlige Bruch der Körper eintrat.

Je minderwertiger der Mörtel bezw. je schlechter er erhärtet ist, desto früher erfolgt das Herausbröckeln des Mörtels beim Druckversuch.

c) Rißbildung.

Die eigentliche Rißbildung trat bei dem Mauerwerk in Zementmörtel kurz vor der Zerstörung ein, in einzelnen Fällen fielen beide Momente völlig zusammen; die Körper in Kalkmörtel dagegen erlitten die ersten Risse bereits bei sehr niedriger Belastung und weit eher, als der vollständige Bruch erfolgte.

Die frühzeitige Rißbildung bei dem Mauerwerk in Kalkmörtel erklärt sich daraus, daß infolge der Zermalmung und Zusammendrückung des Mörtels in den ungleichmäßig dicken Lagerfugen bereits unter verhältnismäßig geringer Last ungleichmäßige Spannungsverteilung im Probekörper eintritt, die vorzeitige Formänderung bewirkt.

Zu bemerken ist, daß die genaue Feststellung des Eintrittes der ersten Risse äußerst schwierig ist; man darf z. B. Absplitterungen einzelner Steinstücke nicht ohne weiteres als Rißbildung ansehen. Auf möglichst genaue Feststellung dieser ersten Risse muß aber besonderer Wert gelegt werden, da die Druckfestigkeit für diesen Zeitpunkt der Berechnung der Tragfähigkeit von Mauerwerk zugrunde gelegt werden sollte.

d) Zerstörung.

Die Art und Weise der Zerstörung der Mauerwerkskörper im Augenblicke des Bruches ist bereits an anderer Stelle besprochen.

Zu 2. Einfluß der Fugendicke auf die Mauerwerksfestigkeit.

Je dicker die Fuge ist, um so geringer wird die Mauerwerksfestigkeit.

Versuche an Körpern mit verschiedener Fugendicke sind im Jahre 1899 in der Abteilung für Baumaterialprüfung ausgeführt worden[1]). Die Probekörper (Fig. 58) bestanden aus je zwei Radialsteinen, die mit Mörtel aus 1 Raumteil Portlandzement + 1 Raumteil hydraulischem Kalk + 3 Raumteilen Mauersand aufeinander gemauert waren. Geprüft wurden Körper mit 1, 1,5, 2, 3 und 5 cm Fugendicke. Die Ergebnisse der bei 28 Tagen Alter der Mauerfuge ausgeführten Druckversuche sind in Tab. 84 als Durchschnittswerte aus je zehn Einzelversuchen wiedergegeben und in Fig. 59 zeichnerisch dargestellt. Aus den Zahlen und dem Verlaufe der Schaulinien ist der Einfluß der Fugendicke deutlich ersichtlich.

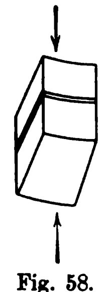


Fig. 58.

Die Festigkeit der Körper nimmt mit zunehmender Dicke der Fuge ab.

Zu 3. Einfluß der Art (Festigkeit) der Steine auf die Mauerwerksfestigkeit.

Die Steine mit hoher Druckfestigkeit haben, wie zu erwarten war, höhere Mauerwerksfestigkeit geliefert, als die mit geringer Festigkeit.

---

[1]) Mitt. Materialpr.-Amt 1899. Heft 1. S. 9.

Die Veränderung der Mauerwerksfestigkeit ist jedoch nicht proportional derjenigen der Druckfestigkeit der Steine (Körper- oder Materialfestigkeit); vielmehr wird das Verhältnis zwischen beiden, namentlich im Vergleich zur Materialfestigkeit, wie aus Tab. 85 hervorgeht, mit fallender Steinfestigkeit etwas günstiger.

Zu 4. Einfluß der Mörtelart auf die Mauerwerksfestigkeit.

Die Mauerwerkskörper in Zementmörtel haben, wie vorauszusehen war, höhere Festigkeiten ergeben, als die in Kalkmörtel, und zwar ist bei den Versuchen des Materialprüfungsamtes die Festigkeit der Körper in Kalkmörtel um mehr als 50% geringer befunden worden, als die der Körper in Zementmörtel.

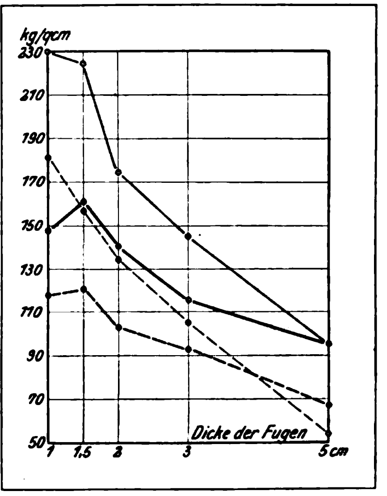


Fig. 59.
Einfluß der Fugendicke auf die Druckfestigkeit von Mauerwerkskörpern.
Werte der Tab. 84.
----- Rißbildung. ----- Zerstauung.
— Lochsteine. — Vollsteine.

Vergleicht man z. B. die für die Zerstörung gefundenen Mauerwerksfestigkeiten der Körper aus Rathenower Mauersteinen, Birkenwerder Klinkern und Kalksandsteinen und setzt die Festigkeit der Mauerkörper in Zementmörtel = 100, so ergibt sich folgendes Verhältnis der Mauerwerksfestigkeiten für die beiden zu den Versuchen benutzten Mörtelarten zueinander:

	28 Tage. σ_{Bmz} σ_{Bmk}		115 Tage. σ_{Bmz} σ_{Bmk}	
Rathenower Mauersteine	100 : 42	Mittel **100 : 45**	100 : 42	Mittel **100 : 44**
Birkenwerder Klinker .	100 : 50		100 : 47	
Kalksandsteine . . .	100 : 42		100 : 42	

Tab. 84. Widerstandsfähigkeit der Mörtelfuge[1]) gegen Druck.

28 Tage alte Probekörper; Mörtelfläche im Mittel 464 qcm; Höhe der Körper mit der 1 cm dicken Fuge = 22 cm (Fig. 58).

Mittelwerte aus je 10 Einzelversuchen.

Fugendicke	1 cm		1,5 cm		2 cm		3 cm		5 cm	
Art der Ziegel	Druckfestigkeit in kg/qcm									
	Rißbildung	Zerstörung	Rißbildung	Zerstörung	Rißbildung	Zerstörung	Rißbildung	Zerstörung	Rißbildung	Zerstörung
Lochziegel . .	117	148	120	160	103	140	93	115	68	96
Vollziegel . .	181	230	156	224	132	174	106	146	54	96

[1]) Der Mörtel bestand aus 1 Raumteil Zement + 1 Raumteil hydraulischer Kalk + 3 Raumteilen Mauersand. Seine Festigkeit, ermittelt an normengemäß gefertigten Proben, betrug nach 28 Tagen Lufterhärtung im Mittel aus je 10 Versuchen 28,7 qcm Zug- und 254 kg/qcm Druckfestigkeit.



Tab. 85. **Veränderung der Mauerwerksfestigkeit durch die Festigkeit der Steine.**

Vergleich der Körper- und Materialfestigkeit mit der Mauerwerksfestigkeit für 28 Tage Alter (Tab. 82). Verhältniszahlen (Werte für die Zerstörung).

Steinsorte[1])	Körperfestigkeit = 100			Materialfestigkeit = 100		
	Material-festigkeit	Mauerwerksfestigkeit		Körper-festigkeit	Mauerwerksfestigkeit	
		Zement-mörtel	Kalk-mörtel		Zement-mörtel	Kalk-mörtel
Rotbrauner Klinker H . . .	113	51	—	89	45	—
Birkenwerder Klinker G . .	167	69	35	60	41	21
Gelbe Klinker F	178	48	—	56	27	—
Kalksandsteine E	96	97	41	105	100	43
„ D	—	100	—	—	—	—
Rathenower Steine C . . .	122	98	42	82	81	34
Hintermauerungssteine B . .	95	—	34	106	—	38
Leichtsteine A	80	—	49	125	—	61

Bei den Versuchen von Böhme und Unwin stellt sich dieses Verhältnis wie folgt:

		σ_{-Bmz} : σ_{-Bmk}	
Böhme	Ziegelsorte 1	100 : 70	Mittel 100 : 72
	„ 2	100 : 73	
Unwin	Ziegelsorte I	100 : 46	Mittel 100 : 57
	„ II	100 : 61	
	„ III	100 : 54	
	„ IV	100 : 43	
	„ V	100 : 84	

Der Einfluß der Mörtelfestigkeit auf die Mauerwerksfestigkeit erklärt sich leicht aus dem verschiedenartigen Verhalten der Mauerkörper mit dem festen Zement- und dem weniger festen Kalkmörtel [2]).

Die Tatsachen lehren, wie wichtig guter Mörtel für die Festigkeit von Mauerwerk ist, namentlich von solchem aus geringwertigen Steinen.

Zu 5. Beziehungen zwischen Körper- bezw. Materialfestigkeit und Mauerwerksfestigkeit.

Nach den vorliegenden Ergebnissen ist die Mauerwerksfestigkeit bei Verwendung von Zementmörtel bis zu einer gewissen Grenze der Steinfestigkeit annähernd gleich der Körperfestigkeit; bei den sehr festen Steinen (Birkenwerder Klinker) wird sie geringer als diese. Bei Verwendung von Kalkmörtel ergeben

[1]) Die Steinsorten sind nach fallender Körperfestigkeit (s. Tab. 82) geordnet.

[2]) Da die Erhärtung von Mörteln aus schwach hydraulischen (mageren) Kalken, ebenso wie die von Mörteln aus Luftkalk, eine unselbständige ist, d. h. auf der Bildung kohlensauren Kalks beruht und solche Mörtel daher nicht wesentlich höhere Festigkeiten erreichen, als Kalkmörtel (siehe Michaelis, Die hydraulischen Mörtel. 1869. S. 271. Verlag Quandt & Händel, Leipzig. Hauenschild, Katechismus der Baumaterialien. II. Teil. Die Mörtelsubstanzen. 1879. S. 214. Verlag Lehmann & Wentzel, Wien und Burchartz, Hydraulische Kalke. Mitt. Materialpr.-Amt 1902. S. 255 ff.), können die aus den Ergebnissen für die Luftkalkmörtel gezogenen Schlußfolgerungen ohne weiteres als auch für Wasserkalkmörtel (aus schwach hydraulischen Kalken) geltend angesehen werden.

sich jedoch in allen Fällen Mauerwerksfestigkeiten, die weit unter der Körperfestigkeit liegen. Das gleiche läßt sich von den Beziehungen zwischen Material- und Mauerwerksfestigkeit sagen; nur liegen hier die Verhältnisse noch weit ungünstiger für das feste Steinmaterial.

Der Grad dieser Festigkeitsveränderung der Mauerwerkskörper gegenüber den Körpern aus zusammengemauerten Steinhälften und den Materialwürfeln ist genauer aus den Verhältniszahlen der Tab. 82 ersichtlich. Hiernach ist z. B. das Verhältnis der Körper- zur Mauerwerksfestigkeit bei Zement- (σ_{-Bmz}) und Kalkmörtel (σ_{-Bmk}) — zieht man nur die Werte der 28 Tage alten Proben für die Zerstörung in Betracht — für

	σ_{-Bk}	σ_{-Bmz}	σ_{-Bmk}
a) Rathenower Mauersteine	100 :	98 :	42
b) Birkenwerder Klinker .	100 :	69 :	35;

das Verhältnis der Material- zur Mauerwerksfestigkeit dagegen für

	σ_{-B}	σ_{-Bmz}	σ_{-Bmk}
a) Rathenower Mauersteine	100 :	81 :	34
b) Birkenwerder Klinker .	100 :	41 :	21,

also erheblich ungünstiger, als das zwischen Körper- und Mauerwerksfestigkeit.

Die gleichen Schlußfolgerungen über die Beziehungen zwischen Steinfestigkeit[1]) und Mauerwerksfestigkeit lassen sich aus den Böhmeschen und Londoner Versuchen ziehen. Auch bei diesen ist die Mauerwerksfestigkeit erheblich niedriger befunden worden, als die Steinfestigkeit. Allerdings ist aus bereits oben angegebenen Gründen der Unterschied zwischen beiden Festigkeiten bei beiden Versuchsreihen bedeutend größer (siehe Tab. 68 und 69), als bei den Versuchen des Materialprüfungsamtes. Weit am ungünstigsten ist das Verhältnis zwischen beiden Festigkeiten bei den Londoner Versuchen. Die großen Unterschiede erklären sich in beiden Fällen aus der bereits oben hervorgehobenen Tatsache, daß bei den Versuchen von Böhme und Unwin die einzelnen Steine in ihrer Urform auf Druckfestigkeit geprüft wurden; ihr Verhältnis $\frac{\sqrt{f}}{h}$ war infolgedessen erheblich günstiger, als bei den Probekörpern, an denen im Materialprüfungsamt die Druckfestigkeit der Steine festgestellt wurde. Hierzu kommt aber noch bei den englischen Versuchen, die einen noch größeren Unterschied zwischen Stein- und Mauerwerksfestigkeit ergaben, als die Böhmeschen, der Umstand, daß

1. die Druckflächen der Ziegelsteine vor dem Versuch abgeglichen wurden, (bei den Böhmeschen Versuchen nicht), und
2. die Mauerwerkskörper nicht, wie die Probekörper für die Versuche von Böhme und dem Amt, Würfel-, sondern Pfeilerform hatten.

Zu 6. Einfluß des Alters auf die Mauerwerksfestigkeit.

Die Zunahme der Festigkeit der Mauerwerkskörper mit fortschreitendem Alter ist innerhalb der zur Prüfung gelangten Altersgrenzen sowohl für Zement- als auch für Kalkmörtel gering, wenigstens im Verhältnis zum Erhärtungsfortschritt der verwendeten Mörtel (Tabelle 74). Für Zementmörtel ist sie nur bei den festen Klinkern

[1]) Die bei den Böhmeschen und englischen Versuchen ermittelte Druckfestigkeit ist hier, im Gegensatz zu der bei den im Amt festgestellten Körperfestigkeit der Steine, Steinfestigkeit genannt, weil sie nicht an Körpern aus zusammengemauerten Steinhälften, sondern an ganzen Ziegelsteinen bestimmt ist.



etwas höher, als bei den anderen Steinsorten, für Kalkmörtel dagegen bei allen drei Steingattungen unbedeutend und kaum nennenswert. Schon Tavernier stellte, wie wir gesehen haben, diese Tatsache der geringen Festigkeitszunahme fest; auch er fand, daß von einem gewissen Alter an keine merkliche Steigerung der Mauerwerksfestigkeit mehr eintritt, trotz beträchtlicher Zunahme der Mörtelfestigkeit. Dieser Prüfungsbefund wird auch noch durch Versuche bestätigt, die vor längerer Zeit in der Abteilung für Baumaterialprüfung auf Antrag der Firma H. R. Heinicke zu Chemnitz mit Mauerwerkskörpern aus Radialsteinen (zwei Sorten) in verlängertem Zementmörtel ausgeführt wurden[1]). Die hierzu verwendeten Probekörper wurden nach Maßgabe der Fig. 64 und 65 aus Steinen von der Form nach Fig. 60 und 61 bezw. 62 und 63 in Mörtel aus 1 Raumteil Zement + 5 Raumteilen hydraulischem Kalk + 20 Raumteilen Mauersand aufgemauert. Die Druckflächen der Körper wurden einige Tage vor der Prüfung

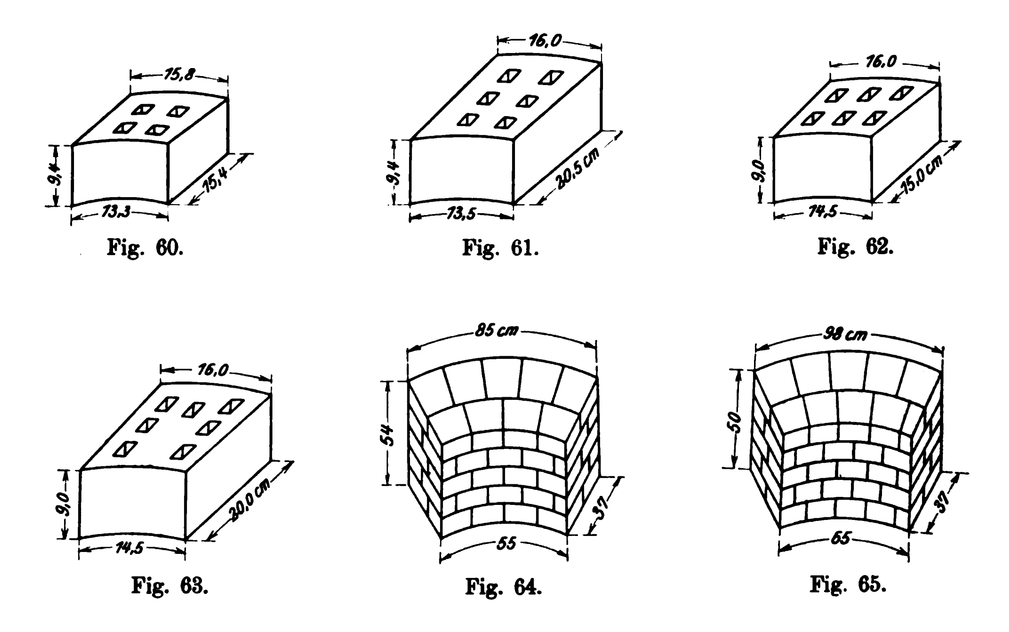


Fig. 60. Fig. 61. Fig. 62.

Fig. 63. Fig. 64. Fig. 65.

mit fettem Zementmörtel abgeglichen. Die Ergebnisse der Druckversuche sind in Tab. 89 wiedergegeben. Tab. 86 enthält die Eigenschaften und Abmessungen der Steine, sowie die Maße der Versuchskörper aus den Steinen, Tab. 87 die Festigkeiten der verwendeten Steinsorten und Tab. 88 die Festigkeiten des benutzten Mörtels.

Auch in diesem Falle ist, wie aus den Festigkeitszahlen ersichtlich, die Zunahme der Mauerwerksfestigkeit mit dem Alter nur unerheblich, während die Mörtelfestigkeit lebhaften Fortschritt zeigt.

Zu 7. Nutzanwendung der Versuchsergebnisse und der daraus gezogenen Schlußfolgerungen für die Praxis.

---

1) O. Jäcker, Mauerwerksfestigkeit und Schornsteinstandsicherheit. Mitteilungen aus der Praxis des Dampfkessel- und Dampfmaschinenbetriebes, sowie des Feuerungs-, Elektro- und allgemeinen motorischen Betriebes. 1902. Nr. 48—53.

Tab. 86. **Eigenschaften und Abmessungen der Steine; Abmessungen der Versuchskörper.**

Steinsorte	Bruchflächenbeschaffenheit			r	s	$\frac{b}{u}$	Mittlere Abmessungen						
							der Steine			der Versuchsstücke			
	Bruch	Gefüge	Farbe				Länge cm	Breite cm	Höhe cm	Länge cm	Breite cm	Höhe cm	gedrückte Fläche qcm
Ziegelei Chemnitz	flachmuschelig, scharfkantig, splittrig	feinkörnig	braunrot	1,907	2,646	0,721	15,4	$\frac{13,3}{15,8}$	9,4	37	$\frac{55}{85}$	54	2590 (Fig. 64)
							(vergl. Fig. 60)						
						0,279	20,5	$\frac{13,5}{16,0}$	9,5				
							(vergl. Fig. 61)						
Ziegelei Grube Ilse	uneben, scharfkantig, splittrig	gleichförmig, fein- bis mittelkörnig	bräunlichgelb	2,098	2,575	0,815	15,0	$\frac{14,5}{16,0}$	9,0	37	$\frac{65}{68}$	50	2820 (Fig. 65)
							(vergl. Fig. 62)						
						0,185	20,0	$\frac{14,5}{16,0}$	9,0				
							(vergl. Fig. 63)						

Tab. 87. **Festigkeit der Steine.**

Mittelwerte aus je 10 Einzelversuchen.

Steinsorte	Steinhöhe		Gedrückte Fläche kg/qcm		Druckfestigkeit kg/qcm	
	nach Figur	nach dem Abgleichen cm	ohne Abzug des Querschnitts der Löcher	mit Abzug des Querschnitts der Löcher	ohne Abzug des Querschnitts der Löcher	mit Abzug des Querschnitts der Löcher
Ziegelei Chemnitz	60	10,6	226	200	445	502
	61	11,0	301	271	468	520
Ziegelei Grube Ilse	62	10,4	229	202	539	610
	63	10,1	305	274	676	754

Tab. 88. **Festigkeit des Mörtels.**

Mittelwerte aus je 10 Einzelversuchen.

Mörtelmischung[1]) (Raumteile)	Zugfestigkeit in kg/qcm nach			Druckfestigkeit in kg/qcm nach		
	7 Tagen	28 Tagen	90 Tagen	7 Tagen	28 Tagen	90 Tagen
1 Zement + 5 hydr. Kalk + 20 Mauersand	7,4	9,0	7,2	32,4	54,6	68,6

[1]) Die Mörtelmaterialien waren von einem Berliner Mörtelwerk bezogen.

Tab. 89. **Festigkeit der Mauerwerkskörper.**

Mittelwerte aus je fünf Einzelversuchen.

Steinsorte	Versuchs-körper nach Fig.	Ge-drückte Fläche qcm	Druckfestigkeit σ_{Bm} in kg/qcm nach 7 Tagen		28 Tagen		90 Tagen	
			Riß-bildung	Zer-störung	Riß-bildung	Zer-störung	Riß-bildung	Zer-störung
Ziegelei Chemnitz	64	2590	57	125	59	130	61	136
Ziegelei Grube Ilse	65	2820	108	mehr als 177 [1])	116	mehr als 177 [2])	117	mehr als 177 [3])

1) Niedrigster Wert der Reihe 173 kg/qcm
2) „ „ „ „ 159 „
3) „ „ „ „ 175 „

Einzelne Körper konnten nicht bis zum völligen Bruch zerstört werden, weil die Kraftleistung der Maschine (500 t) nicht ausreichte.

Nimmt man an, daß in der Praxis für Mauerwerk in Zementmörtel oder Kalkmörtel Mischungen von der Festigkeit der bei den vorgeschilderten Versuchen benutzten verwendet werden — diese Annahme kann man, wenigstens in bezug auf den Kalkmörtel, anstandslos machen, da die Festigkeiten der verschiedenen Luftkalkmörtel im allgemeinen nur wenig voneinander abweichen — und will man auf Grund der gewonnenen Versuchsergebnisse aus der Körperfestigkeit einer Steinsorte schätzungsweise auf deren Mauerwerksfestigkeit schließen, so kann gefolgert werden, daß die **Mauerwerksfestigkeit** (an würfelförmigen in Verband gemauerten Körpern ermittelt, wie in vorliegendem Falle von dem Verfasser benutzt) beträgt unter Zugrundelegung der

28-Tagsfestigkeit

von Mauerwerk in	Zementmörtel 1 : 3	für den Eintritt der Risse	rund **75 %**	der **Körperfestigkeit**
		„ die Zerstörung . . .	„ **85 %**	
	Kalkmörtel	für den Eintritt der Risse	rund **30 %**	
		„ die Zerstörung . . .	„ **40 %**	

und unter Zugrundelegung der

115-Tagsfestigkeit

von Mauerwerk in	Zementmörtel 1 : 3	für den Eintritt der Risse	rund **75 %**	der **Körperfestigkeit**
		„ die Zerstörung . . .	„ **100 %**	
	Kalkmörtel	für den Eintritt der Risse	rund **30 %**	
		„ die Zerstörung . . .	„ **40 %**	

Trägt man ferner, wie in Fig. 66 geschehen, die mittleren Körperfestigkeiten der geprüften Steinsorten als Abszissen und die zugehörigen durchschnittlichen Mauerwerksfestigkeiten als Ordinaten auf und zieht die Ausgleichslinien (für Risse und Zerstörung) zwischen die Werte der beiden Altersstufen, so lassen sich an Hand des gewonnenen Schaubildes die annähernden Mauerwerksfestigkeiten jeder beliebigen Ziegelsteinsorte, soweit deren Festigkeit innerhalb der Grenzen der bei den Versuchen festgestellten liegt, sowohl für Zement- wie für Kalkmörtel abschätzen, wobei die Verwendung gleicher oder wenigstens ähnlicher Mörtelmischungen und gleicher Körperform, wie die benutzten, vorausgesetzt werden muß. Für den Kalkmörtel kann man die gefundene Ausgleichslinie als ziemlich richtig annehmen, da, wie schon gesagt, die in der Praxis verwendeten Kalkmörtel in ihrer Festigkeit

wenig voneinander abweichen. Dies trifft indessen nicht allgemein für Zementmörtel zu, weil die in der Praxis benutzten Zementmörtel und deren Festigkeiten große Verschiedenheiten aufweisen, zumal meistens nicht reine, sondern sogenannte verlängerte Zementmörtel zur Anwendung gelangen.

Der obere Teil von Fig. 66 zeigt uns in gleicher Vorstellungsweise die Beziehungen zwischen Materialfestigkeit und Mauerwerksfestigkeit.

Würde man, um an einem Beispiele die Verwertbarkeit der vorliegenden Ergebnisse für die Praxis darzutun, für Mauerwerk in Kalkmörtel eine Festigkeit von etwa 7, bei zehnfacher Sicherheit also von 70 kg/qcm vorschreiben, so müßte

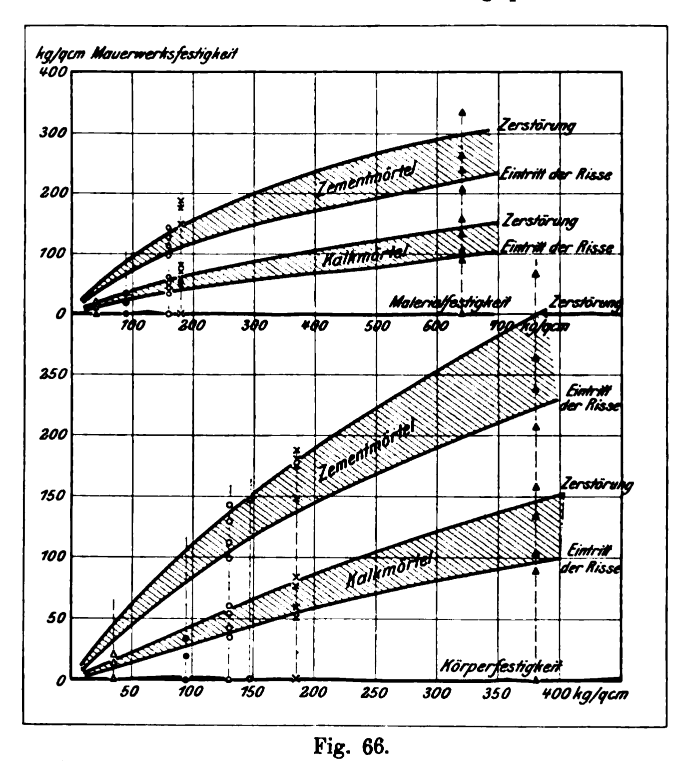


Fig. 66.
Darstellung der Beziehungen zwischen Mauerwerksfestigkeit und Körperfestigkeit, sowie zwischen Mauerfestigkeit und Materialfestigkeit. Werte der Tab. 82.
△ Leichtsteine. • Hintermauerungssteine. o Rathenower Mauersteine. × Kalksandsteine (Reihe 1). ⊙ Kalksandsteine (Reihe 2). ▲ Birkenwerder Klinker.

man Steine verwenden, deren Körperfestigkeit etwa 250 kg/qcm und deren Materialfestigkeit etwa 400 kg/qcm beträgt.

Wollte man ferner für Mauerwerk in Zementmörtel etwa 150 kg/qcm Druckfestigkeit verlangen, so müßte der zur Verwendung gelangende Stein 210—220 kg Körperfestigkeit oder etwa 310 kg/qcm Würfelfestigkeit aufweisen. Die Kalksteine verhalten sich durchschnittlich etwas günstiger, als die Ziegelsteine, vermutlich weil sie wegen ihrer regelmäßigeren Form und ebeneren Lagerflächen Fugen größerer Gleichmäßigkeit liefern, so daß eine gleichmäßigere Spannungsverteilung im Mauerwerk aus solchen Steinen bewirkt wird, als in solchen aus gewöhnlichen Ziegelsteinen.

Auf Grund der vorliegenden Ergebnisse lassen sich, allerdings im teilweisen Gegensatze zu den zurzeit für Berlin maßgebenden baupolizeilichen Bestimmungen



für die zulässige Belastung von Mauerwerk, die in der Zusammenstellung Tab. 90 enthaltenen Grenzwerte für die zulässige Beanspruchung von Mauerwerk auf Druck aufstellen.

Diese Zahlen weisen darauf hin, daß seitens der Baubehörden und überhaupt der für die Innehaltung der Bauvorschriften maßgebenden Organe vor allen Dingen auf die Verwendung guter Mörtel bei Mauerarbeiten hingestrebt werden muß. Da durch diese Maßnahme der Nachteil minderwertiger Steine zum Teil ausgeglichen werden kann, so sollte man vor allem statt des reinen Kalkmörtels häufiger besseren Mörtel, mindestens verlängerten Zementmörtel, verwenden. Schon ein geringer Zusatz von Zement zum Kalkmörtel gewährleistet bekanntlich eine unverhältnismäßig große Steigerung der Mörtelfestigkeit.

Tab. 90. **Vergleich der zulässigen Belastung von Mauerwerk nach den Bestimmungen des kgl. Polizeipräsidiums zu Berlin und nach den Ergebnissen der neuen Versuche**[1].

Art des Mauerwerks		Gewöhnliches Ziegelmauerwerk in Kalkmörtel	Besseres Ziegelmauerwerk in Zementmörtel	Bestes Klinkermauerwerk in Zementmörtel	Poröse leicht gebrannte Wölbziegel in Zementmörtel	Poröse hartgebrannte Wölbziegel in Zementmörtel	Kalksandsteinmauerwerk in Kalkmörtel	Kalksandsteinmauerwerk in Zementmörtel
Zulässige Belastung		Kilogramm für 1 qcm						
Nach den baupolizeilichen Bestimmungen		8	11	14	3	6	Je nach Herkunft der Steine verschieden (7)	(14)
Nach den Versuchsergebnissen der 28 Tagsproben	für den Eintritt der ersten Risse	2—5	10—18	15—20	—	—	2—5	8—12
	für die Zerstörung	3—8	12—20	20—25	—	—	3—7,5	10—18

Der Wert eines guten Mörtels geht so recht klar aus dem Schaubilde Fig. 66 hervor. Hiernach würde z. B. ein Stein mit etwa **200 kg/qcm Körperfestig-**

[1]) Nach dem Runderlaß der Kgl. Ministerien der öffentlichen Arbeiten und für Handel und Gewerbe vom 30. April 1902 (Zentralbl. d. Bauverwaltung 1902. Nr. 49. S. 297) wird die zulässige Belastung der Baustoffe für die Berechnung der Standfestigkeit von Schornsteinen wie folgt festgesetzt:

Unter der Voraussetzung kunstgerechter und sorgfältiger Ausführung, sowie ausreichender Erhärtung des Mörtels ist als Druckbeanspruchung zu rechnen:

a) für gewöhnliches Ziegelmauerwerk in Kalkmörtel mit dem Mischungsverhältnis von 1 Raumteil Kalk und 3 Raumteilen Sand bis zu 7 kg auf 1 qcm;

b) für Mauerwerk aus Hartbrandsteinen in Kalk-Zementmörtel 12—15 kg für 1 qcm. Unter Hartbrandsteinen sind dabei Ziegel verstanden, die eine nachgewiesene Druckfestigkeit von mindestens 250 kg auf 1 qcm besitzen und unter Kalk-Zement-Mörtel wird eine Mischung von 1 Raumteil Zement, 2 Raumteilen Kalk und 6—8 Raumteilen Sand verstanden.

c) Falls für Fundament Schutt- oder Stampfbeton verwendet wird, sind
für geschütteten Beton 6 bis 8 kg } auf 1 qcm
„ gestampften „ 10 „ 15 „ }
Druckbeanspruchung zulässig.



keit in **Kalkmörtel** vermauert nur etwa **65 kg/qcm Mauerfestigkeit,** in gutem **Zementmörtel** vermauert dagegen eine solche von etwa **145 kg/qcm** liefern.

Falls man sich über die Druckfestigkeit von Mauerwerk unterrichten will, genügt es nach den vorliegenden Ergebnissen im allgemeinen, die Festigkeit des Mauerwerks bei 28 Tagen Alter festzustellen, da nennenswerte weitere Zunahme der Festigkeit bei Ziegelsteinen nicht zu erwarten ist; bei Kalksandsteinen dürfte die Zunahme nennenswerter sein, da die Steine selbst innerhalb gewisser Grenzen mit der Zeit an Festigkeit zunehmen.

Zu 8. Beziehungen zwischen Haftfestigkeit des Mörtels am Stein (in der Stoßfuge) und Mauerwerksfestigkeit.

Der Zusammenhang und die Druckfestigkeit von Mauerwerk beruht, abgesehen von dem Steinmaterial, nicht allein auf der Widerstandsfähigkeit des Mörtels gegen Druckbeanspruchung in der Lagerfuge, sondern auch zum Teil auf dem Haftvermögen des Mörtels am Stein oder vielmehr auf dessen Widerstandsfähigkeit gegen Abscheren in der Stoßfuge. Denn auch von dem Reibungswiderstand in den vertikalen Fugen bei der Druckbeanspruchung ist die Art der Spannungsverteilung und mit ihr die Widerstandsfähigkeit des Ganzen abhängig. Je größer daher diese Kraft ist, um so mehr wird die Festigkeit des Verbandes und des gesamten Mauerwerks erhöht. Da nun das Haftvermögen des Zementmörtels am Stein und seine Kohäsion in sich beträchtlicher ist, als die gleichen Festigkeiten beim Kalkmörtel, so muß auch aus diesem Grunde die Festigkeit von Mauerwerk in Zementmörtel größer sein, als die von solchem in Kalkmörtel.

Da zuverlässige Wertziffern für die Beurteilung der Haft- und Scherfestigkeit von Kalkmörtel nicht bekannt waren, wurden mehrere Versuchsreihen zur Feststellung der Größe dieser Eigenschaften mit Kalkmörtel sowohl als auch mit Zementmörtel ausgeführt.

e) Die Haft- und Scherfestigkeit von Kalk- und Zementmörtel.

Die ersten Versuche zur Feststellung der Haftfestigkeit von Luftkalkmörtel sind wohl von Böhme in der ehemaligen Königlichen Prüfungsstation für Baumaterialien ausgeführt worden. Die Ergebnisse dieser Versuche sind von dem Verfasser gelegentlich der Veröffentlichung der Ergebnisse von Kalkmörtelprüfungen in den „Mitteilungen“ 1894 besprochen. Sie bezogen sich auf Mörtel aus

a) 1 Raumteil Kalkpulver + 3 Raumteilen Rheinsand,
b) 1 Raumteil Kalkpulver + $1^1/_2$ Raumteilen Rheinsand + $1^1/_2$ Raumteile Schlackensand.

Die Mittelwerte dieser Versuchsreihen sind in Tabelle 91 wiedergegeben.

Haft- und Scherfestigkeit von Kalkmörtel und Zementmörtel.

Tab. 91. Prüfung von Kalkmörtel auf Haftfestigkeit am Stein.

(Ausgeführt in der Kgl. Prüfungsstation für Baumaterialien.)
Probematerial: Dornap-Wuppertaler Weißkalk, Rheinsand, Schlackensand und Rathenower Mauersteine.
Mittleres Eigengewicht der Steine: 3,632 kg; r = 1,834; Gehalt an Kieselsäure: 71,03 %.
Mittlere Abmessungen der Steine: 24,5 . 12 . 6,5 cm; Haftfläche der Versuchsstücke: 144 qcm.

Mittelwerte aus je fünf Einzelversuchen.

Mörtelmischung (Raumteile)	Haftfestigkeit [1]) in kg/qcm nach			Bemerkungen
	28 Tagen	60 Tagen	90 Tagen	
1 Kalkpulver + 3 Rheinsand [2])	0,58	1,02	1,23	Die Zerstörung erfolgte bei sämtlichen Proben in der Fuge, so daß der Mörtel an beiden Steinen haftete.
1 Kalkpulver + $1^1/_2$ Rheinsand + $1^1/_2$ Schlackensand [2])	0,66	1,16	1,37	

Tab. 92. Prüfung von verlängertem Zementmörtel auf Haftfestigkeit am Stein.

(Ausgeführt in dem Kgl. Materialprüfungsamt.)
Probematerial: Portland-Zement, hydraulischer Kalk, Mauersand und Radialsteine verschiedener Herkunft.

Mittelwerte aus je fünf Einzelversuchen.

Mörtel-mischung (Raumteile)	Steinart	Mittlere Haftfestigkeit in kg/qcm nach				Bemerkungen
		3 Tagen	7 Tagen	28 Tagen	3 Monaten	
1 Zement + 1 hydr. Kalk + 3 Mauersand [3])	Rote Lochziegel von Ferbeck & Co. in Forst bei Aachen	1,1	—	2,6	3,9	Der Mörtel haftete völlig an einem Stein. Die in den Löchern sitzenden Mörtelzapfen wurden abgerissen.
	Rote Vollziegel gleicher Herkunft	0,8	—	1,3	1,6	Der Mörtel haftete völlig an einem Stein.
1 Zement + 5 hydr. Kalk (Rüdersdorf) + 20 Mauersand [4])	Rote Lochziegel der Ziegelei Grube Ilse	—	0,8	1,2	2,4	Bei den 7 und 28 Tage alten Proben haftete der Mörtel an einem Stein. Bei den 90 Tage alten Proben haftete der Mörtel zum Teil an beiden Steinen; der Mörtel riß in der Fuge.
	Gelbe Lochziegel der Ziegelei Chemnitz	—	0,7	1,4	2,1	

[1]) Die Beanspruchung erfolgte auf Abreißen der Fuge (vergl. Fig. 67).

[2]) Die Prüfung der Mörtel auf Festigkeit ergab im Mittel aus 10 Versuchen folgende Werte:

	Zugfestigkeit				Druckfestigkeit			
nach	28	60	90	Tagen	28	60	90	Tagen
1 + 3	3,5	4,1	5,2	kg/qcm	14,7	18,4	22,3	kg/qcm
$1 + 1^1/_2 + 1^1/_2$	5,9	8,1	8,6	„	35,5	48,7	55,1	„

[3]) Bei 28 Tagen betrug die mittlere Zugfestigkeit des Mörtels 28,7 kg/qcm
„ „ Druckfestigkeit „ „ 254 „

[4]) Die Prüfung des Mörtels auf Festigkeit ergab im Durchschnitt folgende Werte:

nach	7	28	90 Tagen
Zugfestigkeit	7,4	9,0	7,2 kg/qcm
Druckfestigkeit	32,4	54,6	68,6 „



Weitere Versuche sind im Materialprüfungsamt auf Antrag der Firmen Ferbeck & Co. in Forst bei Aachen und H. R. Heinicke in Chemnitz mit verschiedenen Steinsorten, jedoch unter Verwendung von verlängertem Zementmörtel, zur Ausführung gelangt. Die Durchschnittswerte dieser Versuche sind in Tab. 92 enthalten. Die ersten Scherversuche mit Kalkmörtel wie auch mit anderen Mörteln sind von Bauschinger[1]) bereits im Jahre 1873 angestellt worden. Er fand für gewöhnlichen Kalkmörtel[2]) die Scherfestigkeit zu 0,5 kg/qcm[3]).

Aus den Ergebnissen vorstehend angegebener Versuchsreihen geht schon hervor, daß die Haft- und Scherfestigkeit von reinem Kalkmörtel sowohl wie von verlängertem Zementmörtel ziemlich gering ist, wenigstens erheblich niedriger als z. B. die Zugfestigkeit der Mörtel. Auch die Zunahme der Haftfestigkeit mit fortschreitendem Alter ist unbedeutend.

Um durch weitere Versuche näheren Aufschluß über die Größe der Haftfestigkeit sowohl wie der Scherfestigkeit von Kalkmörtel und von diesem im Vergleich zu Zementmörtel zu erlangen, wurden auf Anregung des Verfassers drei gesonderte Versuchsreihen angestellt, und zwar bezog sich

Reihe 1 auf Kalkmörtel aus 1 Raumteil Kalkteig + 3 Raumteilen Berliner Mauersand; Steinmaterial: Rathenower Mauersteine; festgestellt wurde die Haftfestigkeit.

Reihe 2 auf Mörtel aus

a) 1 Raumteil Kalkteig + 3 Raumteilen Rheinsand,

b) 1 Raumteil Kalkteig + 1½ Raumteile Rheinsand + 1½ Raumteile Schlackensand.

Steinmaterial: Rathenower Mauersteine; festgestellt wurde die Haftfestigkeit und Scherfestigkeit.

Reihe 3 auf Mörtel aus

a) 1 Raumteil Kalkteig + 3 Raumteilen Mauersand,

b) 1 Raumteil Zement + 3 Raumteilen Mauersand.

Steinmaterial: Birkenwerder Klinker, Rathenower Ziegelsteine, Hintermauerungssteine und Kalksandsteine; festgestellt wurde die Scherfestigkeit.

Außer der Gewinnung von Werten für die in Rede stehenden Eigenschaften bezweckte jede Reihe noch eine besondere Feststellung, und zwar sollte Reihe 1 über die Zunahme der Haftfestigkeit mit fortschreitendem Alter, Reihe 2 über die Beziehungen zwischen Haft- und Scherfestigkeit und Reihe 3 über die Scherfestigkeit von Kalkmörtel im Vergleich zu Zementmörtel, sowie über den Einfluß der Steinbeschaffenheit auf diese Festigkeitsart Aufschluß geben.

Das Kalkmaterial sämtlicher Versuchsreihen war guter Luftkalk. Sein Kalkgehalt betrug rund 96 bezw. 97 %.

Die Herstellung der Probekörper für die Haft- und Scherversuche erfolgte bei sämtlichen Reihen handwerksmäßig in übereinstimmender Weise und möglichst den praktischen Verhältnissen entsprechend. Für die Haftversuche wurden je zwei

---

1) Mitteilungen aus dem mechanisch-technischen Laboratorium der Kgl. Polytechn. Hochschule München. 1873. Heft 1. S. 15.

2) Der Kalkmörtel war zwischen zwei Ziegelsteinen vermauert.

3) Es wurde nur ein Versuch ausgeführt. Die Probekörper für die übrigen Versuche zerbrachen bei der Vorbereitung in der Fuge infolge der geringen Festigkeit des Mörtels.

Steine nach Fig. 67 kreuzweise übereinander gemauert[1]), während für die Scherversuche je zwei Steine mit den Lagerflächen nach Maßgabe der Fig. 68[2]) zusammengemauert wurden. Die Dicke der Mörtelfuge betrug durchschnittlich 1 cm. Um die Wirkung der Auflast der aufliegenden Steinschichten während des Anziehens des Mörtels den praktischen Verhältnissen entsprechend nachzuahmen, wurden die Probekörper bis zum erfolgten Abbinden des Mörtels mit einem Gewichtsstück von 5 kg (d. i. 0,01 kg/qcm) beschwert. Der Mörtel war mauergerecht angemacht; die Steine waren vor der Vermauerung angenäßt. Sämtliche Probekörper lagerten an der Luft im Zimmer.

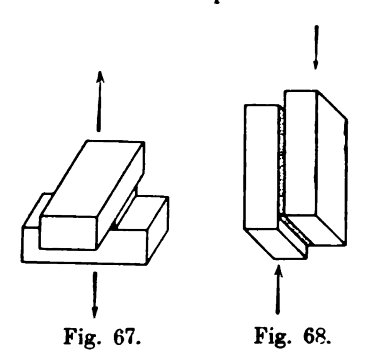


Fig. 67. Fig. 68.

Die Prüfung erfolgte bei den in den Tabellen angegebenen Altersstufen, und zwar die der Körper aus über Kreuz gemauerten Steinen durch Abreißen der Fuge senkrecht zur Haftfläche und der Körper aus flach zusammengemauerten Steinen durch Verschieben der Steine gegeneinander in der Ebene der Haftfläche, wie durch die Pfeilrichtung in Fig. 67 und 68 angedeutet ist.

Zu den Reihen 2 und 3 wurden auch die Festigkeitseigenschaften der Fugenmörtel ermittelt (Tab. 96 und 99). Die Körper hierfür wurden aus dem mauergerecht angemachten Mörtel durch Einfüllen in auf Ziegeln stehende Formen hergestellt.

Die Ergebnisse der Haft- und Scherversuche der drei Reihen sind in den Tab. 93, 97 und 100 zusammengestellt und die der Reihe 3 außerdem durch Fig. 69 veranschaulicht.

Tab. 93. Ergebnisse der Prüfung auf Haftfestigkeit.

Versuchsreihe 1.

Probematerial: Mörtel aus 1 Raumteil Kalkteig + 3 Raumteile Berliner Mauersand, Rathenower Mauersteine.

Alter des Kalkteigs	24 Stunden			7 Tage			28 Tage			Bemerkungen
Versuch Nr.	Haftfestigkeit in kg/qcm nach									
	28 Tagen	3 Monaten	1 Jahr	28 Tagen	3 Monaten	1 Jahr	28 Tagen	3 Monaten	1 Jahr	
1	1,0	0,9	2,4	1,0	1,3	1,7	0,9	1,3	1,7	In allen Fällen haftete der Mörtel beim Bruch der Fuge völlig an einem Steine. Gehalt des Mörtels an kohlensaurem Kalk bei 1 Jahr Alter: 6,6 %.
2	1,0	1,4	2,0	1,3	1,1	1,5	0,8	0,8	1,9	
3	0,9	1,2	1,9	0,8	1,0	2,2	0,9	1,2	1,8	
4	0,9	1,1	1,4	0,9	1,1	1,7	0,8	0,9	1,7	
5	0,9	1,3	2,0	0,9	1,2	1,8	0,8	1,0	1,5	
Mittel	**0,9**	**1,2**	**1,9**	**1,0**	**1,1**	**1,8**	**0,8**	**1,1**	**1,7**	

1) Böhme stellte die Haftfestigkeit an in gleicher Weise vorbereiteten Probekörpern fest.

2) Bauschinger benützte Probekörper von ähnlicher Form.

Tab. 94. Ablöschung des Kalkes[1]) zu Kalkteig.

Versuchsreihe 2.

Gewicht für 1 l Stückkalk in Walnußgröße	Ablöschung zu Kalkpulver			Ablöschung zu Kalkteig			5 kg Stückkalk ergaben im Mittel		Litergewicht des Kalkteigs nach 3 Tagen
	Wasseranspruch	Beginn des Ablöschens	Dauer des Ablöschens	Wasseranspruch	Beginn des Ablöschens	Dauer des Ablöschens	Kalkteig		
kg	%	Min.	Min.	%	Min.	Min.	kg	l	kg
0,953	58,0	sofort	2	300	1	5	20,43	16,2	1,261

1) Chemische Zusammensetzung (bezogen auf den kohlensäure- und wasserfreien Zustand):

Kieselsäure	0,28 %
Eisenoxyd und Tonerde	2,43 „
Kalk	95,98 „
Magnesia	1,14 „
Rest (Alkalien usw.)	0,17 „

Tab. 95. Physikalische Eigenschaften der Mörtelstoffe.

Mörtelstoff	Litergewicht eingelaufen R_f kg	Litergewicht eingerüttelt R_r kg	Spez. Gewicht s	Dichtigkeitsgrad $\mathfrak{d} = \frac{R_r}{s}$	Undichtigkeitsgrad $u = 1 - \mathfrak{d}$	Korngröße Rückstand %	Siebe mit der übergeschriebenen Zahl Maschen für 1 qcm	1	4	9	20	60	120	324	900	S
Kalkteig	—	1,282[1])	—	—	—	Auf den Sieben	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
						Zwischen je 2 Sieben		—	—	—	—	—	—	—	—	—
Rheinsand	1,440	1,721	2,626	0,655	0,345	Auf den Sieben	—	—	—	0,0	0,1	0,3	3,0	42,0	91,0	—
						Zwischen je 2 Sieben		—	—	0,0	0,1	0,2	2,7	39,0	49,0	9,0
Schlackensand	0,408	0,601	2,703[2])	0,222	0,778	Auf den Sieben		0,0	0,8	1,0	3,0	15,0	34,0	52,0	65,0	—
						Zwischen je 2 Sieben		0,0	0,8	0,2	2,0	12,0	19,0	18,0	13,0	35,0

1) Gewicht bei 28 Tagen Alter. Der Gehalt an hygroskopischem Wasser betrug 55,24 %.

2) Das spezifische Gewicht wurde an zerkleinertem Sandpulver bestimmt, das durch das 900-Maschensieb hindurchging.

Tab. 96. Festigkeitseigenschaften der Mörtel zu Tab. 97.

Mittelwerte aus je 10 Einzelversuchen.

Mörtelmischung (Raumteile)	Zugfestigkeit in kg/qcm nach 28 Tagen	60 Tagen	90 Tagen	Druckfestigkeit in kg/qcm 28 Tagen	60 Tagen	90 Tagen
1 Kalkteig + 3 Rheinsand	2,4	2,6	3,2	7,5	8,6	10,7
1 Kalkteig + 1½ Rheinsand + 1½ Schlackensand	4,7	5,2	5.5	67,0	63,6	64,8

Tab. 97. Haft- und Scherfestigkeit der Mörtel.

Steinmaterial: Rathenower Mauersteine.

Art der Versuchsstücke	Über Kreuz gemauerte Ziegel (Fig. 67) Haftfläche = 144 qcm				Mit den Lagerflächen aufeinandergemauerte Ziegel (Fig. 68) Haftfläche = 264 qcm			
Versuch Nr.	Haftfestigkeit in kg/qcm nach			Bemerkungen	Scherfestigkeit in kg/qcm nach			Bemerkungen
	28 Tagen	60 Tagen	90 Tagen		28 Tagen	60 Tagen	90 Tagen	
1 Raumteil Kalkteig + 3 Raumteile Rheinsand.								
1	0,3	0,9	1,2	Der Bruch erfolgte bei allen Proben in der Fuge.	0,7	0,9	1,7	Der Bruch erfolgte bei allen Proben in der Fuge.
2	0,2	1,1	1,0		0,7	1,4	1,2	
3	0,3	1,2	1,3		0,8	0,8	1,4	
4	0,3	0,9	1,4		0,8	1,1	1,4	
5	0,7	1,0	1,3		0,8	1,3	1,3	
6	0,7	1,3	1,1		—	—	—	
7	0,7	1,0	0,8		—	—	—	
8	0,3	1,0	1,3		—	—	—	
9	0,9	1,3	1,2		—	—	—	
10	0,7	1,2	1,2		—	—	—	
Mittel	**0,5**	**1,1**	**1,2**	—	**0,8**	**1,1**	**1,4**	—
1 Raumteil Kalkteig + 1½ Raumteile Rheinsand + 1½ Raumteile Schlackensand.								
1	1,9	1,6	2,4	Bei den 28 und 60 Tage alten Proben haftete die ganze Mörtelfuge an einem Stein; bei den 90 Tage alten haftete er teils an einem Stein, teils riß er in der Fuge.	3,4	3,5	5,3	Bei einigen Proben haftete der Mörtel an Stein, bei anderen riß er in der Fuge. In einigen Fällen haftete er teils am einen, teils am anderen Steine.
2	1,4	1,8	1,4		4,2	5,9	4,1	
3	1,7	1,9	2,3		2,7	5,6	4,4	
4	1,3	2,0	1,9		3,0	3,7	6,4	
5	1,7	2,2	1,8		3,6	4,5	5,8	
6	2,6	2,0	1,4		—	—	—	
7	1,8	2,3	2,2		—	—	—	
8	1,6	1,7	2,4		—	—	—	
9	1,5	1,9	1,9		—	—	—	
10	2,0	2,1	1,5		—	—	—	
Mittel	**1,8**	**2,0**	**1,9**	—	**3,4**	**4,6**	**5,2**	—

Tab. 98. Analyse des Kalkes[1].

(Bezogen auf den kohlensäure- und wasserfreien Zustand.)

Versuchsreihe 3.

Kieselsäure und Unlösliches	0,97 %
Eisenoxyd und Tonerde	0,53 „
Ätzkalk	96,92 „
Magnesia	0,93 „
Schwefelsäureanhydrid	0,66 „

[1]) Ermittelt am Kalkhydratpulver; Glühverlust 24,99 %.

Tab. 99. Raumgewichte und Festigkeiten der Mörtel zu Tab. 100.

Mittelwerte aus je fünf Einzelversuchen.

Mörtelmischung (Raumteile)	Zugproben (Normalformat)				Druckproben (Würfel aus 7,1 cm Kantenlänge)			
	1 Tag	7 Tage	28 Tage	115 Tage	1 Tag	7 Tage	28 Tage	115 Tage
Raumgewicht g/ccm								
1 Zement + 3 Mauersand[1])	1,886	1,857	1,857	1,871	1,907	1,862	1,856	1,882
1 Kalkteig + 3 Mauersand[2])	1,886	1,800	1,814	1,814	1,851	1,746	1,749	1,763
Festigkeit kg/qcm								
1 Zement + 3 Mauersand	—	12,7	16,6	17,7	—	62	76	110
1 Kalkteig + 3 Mauersand	—	3,1	4,9	5,4	—	4,3	6,0	8,6

[1]) Wasserzusatz 9% für mauergerechte Steife.
[2]) Wassergehalt 18,6% für mauergerechte Steife.

Wie aus den gewonnenen Werten ersichtlich, werden die Ergebnisse der vorangegangenen Haftversuche mit Kalkmörtel durch die der neueren Versuche vollauf bestätigt; denn auch nach diesen ist die **Haftfestigkeit** des reinen Kalkmörtels (Mischung 1:3) sehr gering. Sie beträgt im Mittel aus allen Versuchen bei **28 Tagen** Alter **0,8** und bei **90 Tagen 1,2 kg/qcm.**

Die **Scherfestigkeit** der gleichen Mischung ist nur um ein geringes höher, als die Haftfestigkeit; bei **28 Tagen** erreicht sie im Durchschnitt **1,0** und bei **90 Tagen 1,4 kg/qcm.**

Die Höhe beider Festigkeitsarten steigt bis zu **Jahresfrist** auf **2,0 kg/qcm;** sie schreitet also mit zunehmendem Alter nicht nennenswert fort[1]).

Im übrigen sind aus den einzelnen Reihen nachstehende besondere Schlüsse zu ziehen:

Zu Reihe 1. Das Alter des Kalkteiges (Dauer des Einsumpfens) ist ohne Einfluß auf die Haftfestigkeit des aus dem Kalk bereiteten Mörtels.

Zu Reihe 2. Die Scherfestigkeit ist etwas höher, als die Haftfestigkeit, namentlich wird sie durch Verbesserung des Mörtels infolge Zusatzes von Schlackensand erhöht. Sie erreicht sogar bei diesem Mörtel mit Schlackensand die gleiche Höhe wie dessen Zugfestigkeit (Tab. 96).

[1]) Vergl. Burchartz, Die Prüfung und Eigenschaften der Kalksandsteine. 1908. Verlag von Julius Springer, Berlin.

Tab. 100. Ergebnisse der Prüfung von Zement- und

Steinmaterial	Birkenwerder Klinker						Rathenower Ziegelsteine					
Haftfläche	20,0 . 12,0 cm = 240 qcm						20,5 . 11,7 cm = 240 qcm					
Alter der Versuchsstücke	7 Tage		28 Tage		115 Tage		7 Tage		28 Tage		115 Tage	
Versuch Nr.	Bruchlast kg	Bemerkungen	Bruchlast kg	Bemerkungen	Bruchlast kg	Bemerkungen	Bruchlast kg	Bemerkungen	Bruchlast kg	Bemerkungen	Bruchlast kg	Bemerkungen
1 Raumteil Zement +												
1	1500	In der Fuge gerissen	2450	In der Fuge gerissen	6800	In der Fuge gerissen	1800	In der Fuge gerissen	2700	In der Fuge gerissen	7750	In der Fuge gerissen
2	2180	„	3150	„	4900	„	1700	„	2450	„	6600	„
3	2190	„	4350	„	5150	„	2800	„	3150	„	6000	„
4	1930	In der Fuge gerissen. Mörtel haftete zum größten Teil an ein. Stein	2050	„	5650	„	1400	„	2850	„	9700	„
5	2400	In der Fuge gerissen	4400	„	5400	„	1600	„	2450	„	4800	„
Mittel	2040	—	3280	—	5580	—	1860	—	2720	—	6970	—
Mittlere Scherfestigkeit σ_B in kg/qcm	**8,5**	—	**13,7**	—	**23,3**	—	**7,8**	—	**11,3**	—	**29,0**	—
1 Raumteil Kalkteig +												
1	65	Mörtel haftete an einem Stein	270	In der Fuge gerissen	485	In der Fuge gerissen	35	Mörtel haftete an einem Stein	245	In der Fuge gerissen	350	In der Fuge gerissen
2	60	„	250	„	330	„	40	Mörtel haftete zum größten Teil an ein. Stein	260	„	515	„
3	45	„	235	„	370	„	40	Mörtel haftete an einem Stein	210	„	270	„
4	65	„	275	„	260	„	60	„	210	Zum Teil in der Fuge gerissen	270	„
5	35	Mörtel haftete zum größten Teil an ein. Stein	290	„	375	„	35	„	320	In der Fuge gerissen	300	„
Mittel	54	—	264	—	364	—	42	—	249	—	341	—
Mittlere Scherfestigkeit σ_B in kg/qcm	**0,2**	—	**1,1**	—	**1,5**	—	**0,2**	—	**1,0**	—	**1,4**	—
Verhältniszahlen; Festigkeit												
Mittel	**2,4**	—	**8,0**	—	**6,5**	—	**2,6**	—	**8,9**	—	**4,9**	—

Kalkmörtel auf Scherfestigkeit. (Siehe Fig. 69.)

Hintermauerungssteine						Kalksandsteine					
20,5 . 12,0 cm = 246 qcm						20,5 . 12,0 cm = 246 qcm					
7 Tage		28 Tage		115 Tage		7 Tage		28 Tage		115 Tage	
Bruchlast kg	Bemerkungen	Bruchlast kg	Bemerkungen	Bruchlast kg	Bemerkungen	Bruchlast kg	Bemerkungen	Bruchlast kg	Bemerkungen	Bruchlast kg	Bemerkungen
3 Raumteile Mauersand											
1600	In der Fuge gerissen	2600	In der Fuge gerissen	7000	In der Fuge gerissen	2060	In der Fuge gerissen	2800	In der Fuge gerissen	8900	In der Fuge gerissen
1900	„	2450	„	9100	„	2330	„	3250	„	5200	Mörtel haftete zum größtenTeil an einem Stein
2100	„	3200	„	8350	„	1940	Mörtel haftete an einem Stein	3400	„	4800	In der Fuge gerissen
1925	„	2350	„	8000	„	1480	„	3700	„	[1500][1])	Stein ausgerissen. Mörtel haftete zum größten Teil an einem Stein
2100	„	3250	„	5400	„	2010	In der Fuge gerissen	3600	„	4000	Mörtel haftete zum Teil an einem Stein
1925	—	2770	—	7570	—	1964	—	3350	—	5725	—
7,8	—	**11,8**	—	**30,8**	—	**8,0**	—	**13,6**	—	**23,3**	—
3 Raumteile Mauersand											
40	Mörtel haftete zum größten Teil an einem Stein	275	In der Fuge gerissen	410	In der Fuge gerissen	155	Mörtel haftete an einem Stein	245	Mörtel haftete an einem Stein	270	Mörtel haftete an einem Stein
55	Mörtel haftete an einem Stein	285	„	410	„	230	„	240	„	175	„
50	Mörtel haftete zum größten Teil an einem Stein	305	„	405	„	205	„	175	„	150	„
55	Zum Teil in der Fuge gerissen	225	„	415	„	200	„ vom andern Steine haften 2 Stücke daran	230	„	205	„
65	Mörtel haftete an einem Stein	335	„	510	„	190	Mörtel haftete an einem Stein	175	„	240	„
53	—	285	—	430	—	196	—	213	—	208	—
0,2	—	**1,2**	—	**1,7**	—	**0,8**	—	**0,9**	—	**0,8**	—
des Zementmörtels = 100.											
2,6	—	**10,6**	—	**5,5**	—	**10,0**	—	**6,6**	—	**3,5**	—

[1]) Vermutlich Fehler im Steinmaterial; von der Berechnung des Mittelwertes ausgeschlossen.

Zu Reihe 3. Die Scherfestigkeit des Kalkmörtels ist weit niedriger, als die des Zementmörtels. Sie nimmt von 28 Tagen Alter an kaum mehr zu, während die des Zementmörtels stetig und lebhaft fortschreitet und, nach dem Verlauf der Schaulinie in Fig. 69 zu urteilen, auch noch weiter wesentlich fortschreiten wird.

Die Beschaffenheit des Steinmaterials scheint, soweit die Versuche einen zuverlässigen Schluß nach dieser Richtung hin zulassen, auf die Scherfestigkeit weder des Kalkmörtels noch des Zementmörtels besonderen Einfluß auszuüben. Der Bruch ging zumeist durch die Fuge selbst. Die Kalksandsteine begünstigen anscheinend etwas die Anfangsfestigkeit des Kalkmörtels. Bei höherem Alter scheint geringere Porosität der Steine auf die Scherfestigkeit des Zementmörtels ungünstig zu wirken. (Die ziemlich dichten Birkenwerder Klinker und Kalksandsteine ergaben bei 115 Tagen Alter geringere Werte, als die porösen Rathenower Steine und Hintermauerungssteine.)

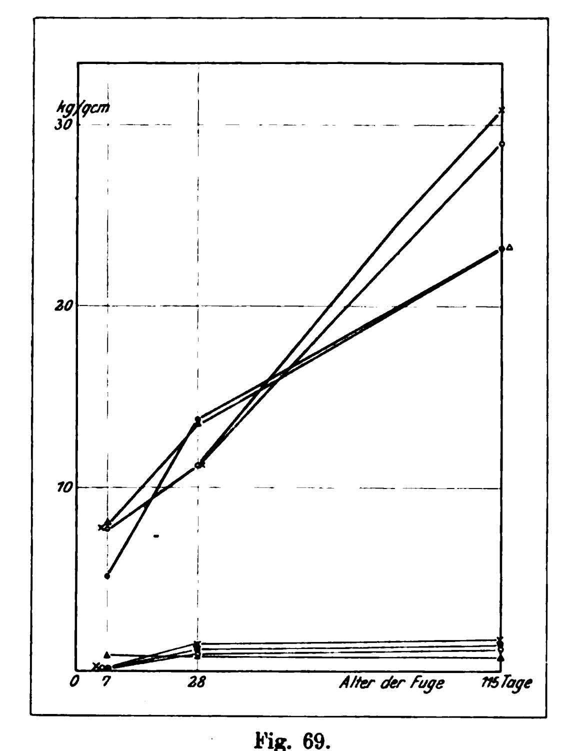


Fig. 69.
Haften von Zement- und Kalkmörtel an Steinen verschiedener Art. Mittelwerte nach Tab. 100. —— Zementmörtel. — Kalkmörtel. • Birkenwerder Klinker. o Rathenower Mauerstein. × Hintermauerungssteine. △ Kalksandsteine.

Aus den Ergebnissen aller vorgeschilderten Versuche ist zu ersehen, innerhalb welch bescheidener Grenzen sowohl die Haftfestigkeit als auch die Scher-(Schub-)Festigkeit der Luftkalkmörtel liegt und **wie berechtigt daher der von Lehmann und Nußbaum**[1]) **erhobene warnende Einspruch gegen die Verwendung solcher Mörtel für Gebäudeteile ist, die entweder stark belastet oder gar auf Zug oder Schub in Anspruch genommen sind.** Gegen die Verwendung von Kalkmörtel muß also namentlich in den Fällen gewarnt werden, in denen das Mauerwerk nicht aus Ziegelsteinen in regelmäßigem Verband, sondern, wie es häufig vorkommt, aus unregelmäßig behauenen Bruchsteinen oder aus Findlingen, deren Form die Herstellung wagerechter Lagerfugen nicht gestattet, errichtet wird, da in

[1]) H. Chr. Nußbaum, Ein Beitrag zu den Trockenverhältnissen der Neubauten. Archiv f. Hygiene. Jubelband. (17.)

solchen Fällen einerseits wenig oder gar keine Gewähr für innige Verkittung zwischen Mörtel und Stein gegeben ist und andererseits die mehr oder minder schräg verlaufenden Mauerfugen nicht in senkrechter Richtung auf Druck, sondern auf Abscheren beansprucht werden. Ebensowenig sollte, wie auch Nußbaum rät, Luftkalkmörtel für Gebäudeteile verwendet werden, die dem Luftzutritt mehr oder weniger entzogen sind, also namentlich bei sehr starken Mauern und bei Mauerwerk aus wenig porösen Bruchsteinen; denn durch die Verhinderung des Luftzutrittes wird nicht nur die spätere Erhärtung des Mörtels, die lediglich auf Aufnahme von Kohlensäure aus der Luft beruht, sondern auch die anfängliche Abgabe des Mörtelwassers, die für die Anfangserhärtung (Anziehen) des Mörtels notwendig ist, erschwert oder gar völlig verhindert wird. In solchen Gebäudeteilen bleibt der Mörtel feucht und weich, ohne zu erhärten.

f) Einfluß des Alters der Fuge auf die Körperfestigkeit.

Eine Frage, die allerdings mit den Festigkeitseigenschaften des Kalkmörtels nicht in unmittelbarem Zusammenhang steht, auf die aber bei den vorgeschriebenen Druckversuchen mit Körpern aus zusammengemauerten Steinhälften die Aufmerksamkeit gelenkt wurde, war die, ob das Alter des die beiden Steinhälften verbindenden Mörtels auf die Festigkeit des Körpers von Einfluß ist. Es war nicht ausgeschlossen, daß das Alter dieser Fuge, wenigstens bei den festeren Steinen, die Festigkeit des Mörtels und damit des Körpers beeinflußt und dieser Einfluß für einzelne Prüfungsbefunde in gewisser Beziehung ausschlaggebend gewesen ist. Die Feststellung dieses Einflusses war um so wichtiger, als bekanntlich die Druckfestigkeit von Vollsteinen in Normalformat einheitlich an Körpern aus mit reinem Zement zusammengemauerten Steinhälften (siehe Fig. 37 S. 114) bestimmt wird.

Bereits frühere in der Abteilung für Baumaterialprüfung ausgeführte Druckversuche mit Ziegelkörpern aus Rathenower Ziegeln und Birkenwerder Klinkern[1]) lieferten den Nachweis, daß das Alter der Proben (die aus zwei Steinhälften bestehen) auf die Körperfestigkeit von Einfluß ist; denn nach den Ergebnissen dieser Versuche (Tab. 101) schreitet die Festigkeit der Körper mit zunehmendem Alter der Fuge innerhalb der zur Prüfung gelangten Altersstufen fort. Diese Versuche waren jedoch wenig umfangreich und erstreckten sich auf nur zwei Altersstufen; ihr Ergebnis war daher nicht genügend beweiskräftig.

Tab. 101. Festigkeit von Ziegelkörpern aus zwei Steinarten mit zwei verschiedenen Mörteln nach 7 und 28 Tagen Alter der Körper.
Mittelwerte aus je 10 Einzelversuchen.

Abgeglichen und vermauert mit	Druckfestigkeit in kg/qcm von			
	Rathenower Ziegeln nach		Birkenwerder Klinkern nach	
	7 Tagen	28 Tagen	7 Tagen	28 Tagen
Reinem Zement	115	126	383	447
Mörtel aus 1 Teil Zement + 1 Teil feinem Mauersand	99	113	345	391

1) Mitt. Materialpr.-Amt 1899. Heft 4. S. 171.

Weitere ausgedehnte Versuche sollten daher über den Einfluß des Alters der Mörtelbänder auf die Körperfestigkeit zuverlässigen und maßgebenderen Aufschluß geben.

Von zehn Ziegelsorten[1]), deren Festigkeit, wie durch Vorproben festgestellt war, innerhalb ziemlich weiter Grenzen schwankte, wurden je 40 Steine in der üblichen Weise zu Druckprobekörpern verarbeitet. Gleichzeitig wurden, um die Erhärtungsfähigkeit und Festigkeit des zum Vermauern der Steinhälften verwendeten Zements in dem Zustande und in der Steife zu ermitteln, in denen Zement gewöhnlich zur Herstellung der Verbindungsschicht zwischen den Steinhälften verarbeitet wird, aus dem mauergerecht angemachten Zementbrei (Wasserzusatz 25,0 %) Zug- und Druckproben in Normalformat angefertigt, und zwar durch Einfüllen des Mörtels in Formen, die auf angenäßten, geebneten Dachziegeln (Biberschwänzen) standen.

Sämtliche Probekörper lagerten im Zimmer an der Luft bei annähernd gleichbleibender Luftwärme und Feuchtigkeit. Ihre Prüfung erfolgte bei 7 Tagen, 28 Tagen und 3 Monaten Alter, die der Ziegelkörper außerdem noch bei 14 Tagen Alter.

Die Ergebnisse der Zementprüfung sind in Tab. 102—104, die der Druckversuche mit Ziegelkörpern in Tab. 105 verzeichnet (nach steigender 7-Tagsfestigkeit der Ziegelkörper geordnet). Die Mittelwerte der Druckversuche sind außerdem in Fig. 70 (S. 174) zeichnerisch dargestellt.

Aus dem Prüfungsbefund geht hervor, daß tatsächlich die Druckfestigkeit der Ziegelkörper — von den unvermeidlichen Schwankungen abgesehen, die in der Ungleichmäßigkeit des Ziegelmaterials begründet sind — mit fortschreitendem Alter in geringem Grade zunimmt.

Einfluß des Alters des Mörtelbandes auf die Festigkeit von Ziegelkörpern aus zusammengemauerten Steinhälften.

Tab. 102. **Eigenschaften des Zementes** (Rüdersdorfer).

a) Physikalische Eigenschaften.

Litergewicht in kg		Spezifisches Gewicht	Glühverlust	Mahlfeinheit						Abbindeverhältnisse			Raumbeständigkeitsprobe
				Rückstand	Siebe mit der übergeschriebenen Anzahl Maschen auf 1 qcm					Wasserzusatz	Erhärtungsanfang nach	Abbindezeit	
R_f	R_r	s	%	%		600	900	5000	S	%			
1,304	2,126	3,191[2])	1,18	Auf den Sieben	—	0,0	0,2	18,0	—	22,0	5 Stdn.	10 Stdn.	bestanden
		3,226[3])		Zwischen je 2 Sieben	0,0	0,2	17,8	82,0					

[1]) Von der Ausdehnung der Versuche auf Kalksandsteine wurde Abstand genommen, weil diese Steine selbst mit wachsendem Alter fester werden; es wäre daher bei der Verwendung solcher Steine der Einfluß der Erhärtungsdauer des Mörtelbandes auf die Körperfestigkeit nicht klar genug zum Ausdruck gekommen.

[2]) Im Anlieferungszustand.

[3]) Nach dem Glühen.

Tab. 103. b) Normenfestigkeit ($8^1/_4$ Wasser).

Zugfestigkeit im Mittel aus je 10 Versuchen nach { 7 Tagen: 19,9 kg/qcm; 28 „ 26,3 „

Druckfestigkeit im Mittel aus je 5 Versuchen nach { 7 Tagen: 157 kg/qcm; 28 „ 264 „

Tab. 104. Festigkeit des mauergerecht angemachten reinen Zementes.

Die Probekörper wurden durch Einfüllen des mauergerecht angemachten Zementbreies in auf Steinunterlagen lagernde Formen hergestellt. (Wasserzusatz 25,0 %.)

Versuch Nr.	Zugfestigkeit in kg/qcm nach			Druckfestigkeit in kg/qcm nach			Verhältnis Zug : Druck für		
	7 Tagen	28 Tagen	3 Monaten	7 Tagen	28 Tagen	3 Monaten	7 Tage	28 Tage	3 Monate
1	31,2	54,0	36,7	320	470	462	—	—	—
2	43,2	45,3	45,0	370	467	451	—	—	—
3	32,6	41,5	29,4	366	424	493	—	—	—
4	38,2	39,8	36,8	400	504	486	—	—	—
5	25,5	26,8	38,3	381	465	488	—	—	—
6	36,0	35,8	44,7	—	—	—	—	—	—
7	31,8	48,2	34,2	—	—	—	—	—	—
8	26,5	40,8	32,8	—	—	—	—	—	—
9	32,5	34,3	40,8	—	—	—	—	—	—
10	29,6	37,7	44,1	—	—	—	—	—	—
Mittel	**32,7**	**40,4**	**38,3**	**367**	**466**	**476**	$\frac{1}{11,2}$	$\frac{1}{11,5}$	$\frac{1}{12,4}$

Diese Zunahme dürfte allerdings in der ersten Zeit der Erhärtung mehr auf das Austrocknen des Steinmaterials und des Mörtels als auf den Fortschritt der Zementfestigkeit zurückzuführen sein; denn die beiden Stoffe waren, wie die Beobachtung ergab, sogar nach 14 Tagen Lagerung zum Teil noch feucht.

Der Grad der Festigkeitsveränderung mit zunehmender Erhärtungsdauer ist aus den Verhältniszahlen (Tab. 105), bezogen auf die 7-Tagsfestigkeit der Zementkörper, ersichtlich.

> Hiernach ist der Festigkeitsfortschritt für die verschieden festen Ziegelsorten von annähernd gleichem Grade. Die Ergebnisse dieser Versuche lassen also den Einfluß des Alters der Mörtelbänder auf die Körperfestigkeit erkennen und zeigen im besonderen, daß dieser Einfluß in der ersten Zeit der Erhärtung am größten ist.

Die Ergebnisse lehren ferner, daß man bei der Prüfung von Mauersteinen auf Druckfestigkeit den zu diesem Zweck vorbereiteten Körpern aus Steinhälften zunächst ausreichende Zeit zum Austrocknen des Fugen- und Abgleichmörtels und der Steinhälften lassen und daß man die Prüfung der Versuchskörper möglichst bei gleichem Alter, auf jeden Fall aber im gleichen Trockenzustande vornehmen muß.

Tab. 105. Ergebnisse der Prüfung von Ziegelkörpern auf

Die Proben lagerten

Ziegelsorte (Farbe)	Hintermauerungssteine II. Kl. (dunkelrot)				Poröse Ziegel (rötlich gelb)				Hintermauerungssteine (rot)			
Mittleres Gewicht der Ziegel im lufttrockenen Zustande	3,548 kg				2,150 kg				3,416 kg			
Mittlere Abmessungen der Ziegel	24,5 . 12,0 . 6,5 cm				25,0 . 12,0 . 6,5 cm				24,5 . 12,0 . 6,5 cm			
Mittlere Abmessungen der Versuchsstücke	11,8 . 12,0 . 15,6 cm				12,1 . 12,0 . 15,1 cm				11,8 . 12,0 . 15,9 cm			
Gedrückte Fläche	142 qcm				145 qcm				142 qcm			
Alter der Proben	7 Tage [1])	14 Tage [2])	28 Tage	3 Monate	7 Tage [1])	14 Tage [2])	28 Tage	3 Monate	7 Tage [1])	14 Tage [2])	28 Tage	3 Monate
Versuch Nr.	Bruchlast in kg bei der Zerstörung *)				Bruchlast in kg bei der Zerstörung *)				Bruchlast in kg bei der Zerstörung *)			
1	9 810	15 850	11 980	19 500	27 850 [1])	18 450	17 950	13 100	14 400	17 050	22 370	20 000
2	17 050	11 980	24 780 [3])	15 000	9 900 [3])	7 700	23 600	17 550	18 260	13 430	13 670	14 500
3	11 020	15 370	11 980	14 500	30 000 [1])	12 450	19 900	17 800	12 470	11 980	13 670	24 000
4	10 540	17 780	12 220	20 500	16 500 [2])	13 500	11 250	16 900	22 610	22 130	17 300	17 500
5	17 780	18 990	13 920	15 000	24 300 [1])	24 500 [1])	13 300	18 850	15 610	17 050	20 680	20 500
6	13 920	10 050	12 470	16 000	8 100 [3])	24 400 [1])	16 100	19 300	17 050	14 160	14 400	12 000
7	12 710	11 740	15 370	15 500	17 250 [2])	13 300	18 000	21 550	19 470	19 470	15 610	19 500
8	12 950	11 020	17 300	14 500	7 600 [3])	14 200	11 650	19 100	16 570	14 640	20 920	19 000
9	13 430	16 330	17 780	13 000	8 050 [3])	14 400	16 150	34 000	12 950	21 880	17 300	21 500
10	13 430	10 050	11 020	14 000	7 600 [3])	26 400 [1])	16 300	39 500	19 950	14 640	14 160	17 500
Mittel	13 264	13 916	14 882	15 750	15 715	16 930	16 420	21 765	16 934	16 643	17 008	18 600
Mittlere Druckfestigkeit σ_{-B} in kg/qcm	**93**	**98**	**105**	**111**	**108**	**117**	**118**	**150**	**119**	**117**	**120**	**131**
Verhältniszahlen. Festigkeit der 7 Tage alten Proben = 100	100	105	113	119	100	108	105	139	100	98	101	110
Bemerkungen	1) Ziegelmaterial, Mörtel der Fuge und Abgleichschichten waren sehr feucht. 2) Ziegelmaterial und Mörtel der Fuge waren noch etwas feucht. 3) Dichteres Material.				1) Fuge etwas feucht, dichteres Material. 2) Abgleichschichten und Fugenmörtel noch feucht. 3) Abgleichschichten und Fugenmörtel feucht. An der Fuge tritt bei der höchsten Belastung Feuchtigkeit heraus.				1) Ziegelmaterial, Mörtel der Fuge und Abgleichschichten waren feucht. 2) Ziegelmaterial etwas feucht; der Mörtel der Fuge noch feucht.			

*) Risse und Zerstörung fielen annähernd zusammen.



Druckfestigkeit bei verschiedenem Alter der Fuge. (Siehe Fig. 70.)

im Zimmer an der Luft.

Hintermauerungssteine II. Kl. (rot)				Hintermauerungssteine I. Kl. (blaßrot)				Klinker (gelblich-grau)			
3,529 kg				3,353 kg				3,412 kg			
25,0 . 12,0 . 6,5 cm				25,0 . 12,0 . 6,5 cm				24,5 . 12,0 . 6,5 cm			
12,1 . 12,0 . 15,4 cm				12,1 . 12,0 . 15,7 cm				11,9 . 12,0 . 15,3 cm			
145 qcm				145 qcm				143 qcm			
7 Tage [1])	14 Tage [2])	28 Tage	3 Monate	7 Tage [1])	14 Tage [2])	28 Tage	3 Monate	7 Tage [1])	14 Tage	28 Tage	3 Monate
Bruchlast in kg bei der Zerstörung *)				Bruchlast in kg bei der Zerstörung *)				Bruchlast in kg bei der Zerstörung *)			
18 020	29 860	36 130	25 000	22 370	31 540	36 620	28 000	61 730	67 770	63 420	72 000
23 090	22 370	18 990	38 500	22 370	29 130	24 540	26 500	57 140	71 150	77 910	68 000
23 580	36 130	33 480	31 000	21 640	22 850	30 340	48 000	56 180	83 710	48 930	73 000
26 960	18 990	28 890	35 500	25 510	25 030	32 270	27 000	68 980 [2])	76 710	62 940	54 000
15 610	28 650	18 990	25 000	30 100	27 920	52 310	22 000	37 100	65 110	61 250	46 000
22 610	17 780	23 580	41 500	27 440	20 200	38 310	36 000	74 770	66 560	61 730	81 000
36 620	23 090	32 270	28 500	25 750	37 340	26 960	32 000	64 630	74 770	64 150	87 500
36 370	20 440	31 540	20 000	29 860	35 170	36 860	31 000	52 560 [2])	71 150	51 350	86 000
31 300	34 930	23 330	26 000	29 860	20 920	27 440	50 000	79 600	42 650 [3])	93 850	68 000
25 510	37 580	27 440	25 500	31 300	22 610	28 890	45 000	67 050	52 070 [3])	48 690	67 500
25 967	26 982	27 464	29 650	26 620	27 271	33 454	34 600	61 974	67 165	63 422	70 300
179	**186**	**189**	**204**	**184**	**188**	**231**	**239**	**433**	**470**	**444**	**492**
100	104	106	114	100	102	126	130	100	108	103	114

Hintermauerungssteine II. Kl.:

1) Ziegelmaterial, Mörtel der Fuge und Abgleichschichten feucht.

2) Ziegelmaterial und Mörtel der Fuge noch feucht.

Hintermauerungssteine I. Kl.:

1) Ziegelmaterial, Mörtel der Fuge und Abgleichschichten noch feucht.

2) Ziegelmaterial und Mörtel der Fuge noch feucht.

Klinker:

1) Ziegelmaterial, Mörtel der Fuge und Abgleichschichten feucht.

2) Bei der höchsten Belastung tritt aus der Fuge Feuchtigkeit heraus.

3) Ziegelmaterial und Fugenmörtel noch feucht.

Angesichts des durch die Versuche festgestellten Einflusses der Zeit auf die Körperfestigkeit und der durch die weiter oben beschriebenen vergleichenden Festigkeitsversuche mit Körpern aus Steinhälften und Materialwürfeln nachgewiesenen Tatsache, daß bei der Prüfung der Mauersteine (namentlich der gebrannten Tonsteine) auf Druckfestigkeit nach dem jetzt üblichen Verfahren die Steinsorten ge-

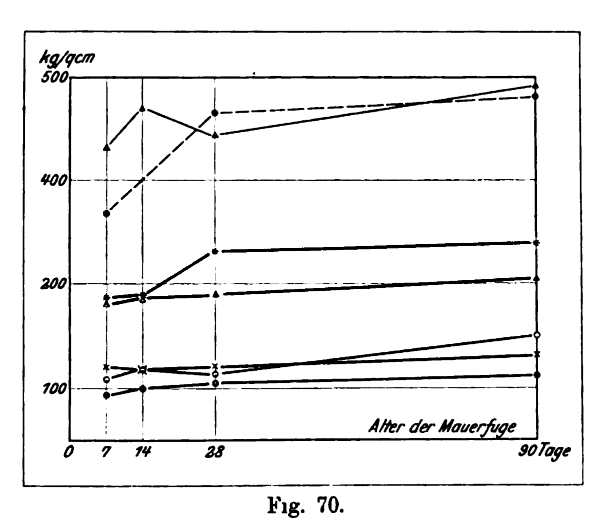


Fig. 70.

Einfluß des Alters der Fuge auf die Festigkeit von Körpern aus zusammengemauerten Steinhälften. Mittelwerte nach Tab. 105.

•—• Hintermauerungssteine I. Kl. (dunkelrot). o—o Poröse Ziegel (rötlichgelb).
×—× Hintermauerungssteine II. Kl. (rot). △—△ Hintermauerungssteine II. Kl. (rot).
--- Hintermauerungssteine I. Kl. (blaßrot). ▲—▲ Klinker (gelblich grau).
•----• Mauer-(Fugen-)mörtel aus reinem Zement.

ringerer Qualität begünstigt, die besseren, festeren dagegen benachteiligt werden, wäre es zu überlegen, ob man nicht statt dieses Verfahrens die Druckprobe mit Materialwürfeln (aus den Steinen herausgeschnitten), wie sie bei anderen Baustoffen üblich ist, einführen sollte, namentlich da dieses Verfahren einfacher und weniger zeitraubend ist.

III. Abschnitt.

Ich schließe die vorliegende Arbeit mit einigen gelegentlich ausgeführten Versuchen über den Einfluß des Zusatzes von Magermilch auf die Erhärtungsfähigkeit von Luftkalk, sowie über die Erhärtung von verlängertem Zementmörtel bei Luftabschluß.

a) Einfluß des Zusatzes von Magermilch zu Luftkalkmörtel auf dessen Erhärtung und Festigkeitseigenschaften.

Prof. Dr. Lehmann in Würzburg und Prof. Nußbaum[1]) mit seinen Schülern haben festgestellt, daß Kalkmörtel aus Luftkalk nur bei freiem Zutritt der Luft erhärten kann, daß dagegen bei mangelnder Luftzufuhr oder bei Luftabschluß innerhalb starker Mauern und hinter Werksteinverblendung der Kalk nur in den alleräußersten Schichten in kohlensauren Kalk übergeht, nach innen zu jedoch in Form von Ätzkalk vorhanden bleibt. (Diese Beobachtungen sind durch die Ergebnisse der Versuche des Verfassers bestätigt worden.)

Zum Versetzen von Werkstücken sollen daher nur Mörtel verwendet werden, die wasserabweisend wirken, eine rasche und hohe Erhärtung aufweisen und derart zusammengesetzt sind, daß die auf die Schauseite der Werkstücke gelangten Teilchen des Mörtels sich — wenigstens in frischem Zustande — entfernen lassen, ohne Flecke zu hinterlassen. Nicht selten wird gefordert, daß die an der Schauseite sichtbaren Fugen helle und gefällige Färbung aufweisen. Mörtel, der diese sämtlichen Forderungen erfüllt, ohne Mißstände anderer Art aufzuweisen, soll sich nun nach Nußbaum durch Zusatz von Magermilch zu Kalkmörtel gewinnen lassen. Die Eiweißteile der Magermilch sollen mit dem Ätzkalk des Kalkmörtels eine innige Verbindung eingehen und diesem eine wesentlich höhere Widerstandsfähigkeit gegen Zug- und Druckbeanspruchung geben, als der reine Kalkmörtel sie besitzt. Solcher Art bereiteter Mörtel soll bei ausreichendem Milchzusatz für Wasser undurchlässig sein, während eine gewisse, aber nicht hohe Durchlässigkeit für Gase erhalten bleibt; seine Farbe soll ein fein wirkendes ins Gelbliche spielendes Weiß sein. Ruß und Staub sollen (nach dem Glätten der Fugen) nicht fest an ihm haften, sondern vom Regen leicht fortgespült werden.

---

[1]) K. B. Lehmann und H. Chr. Nußbaum, Studien über Kalkmörtel und Mauerfeuchtigkeit. Archiv für Hygiene. Bd. 9. S. 139—223; siehe auch Tonindustrie-Zeitung 1899. Nr. 109. S. 1438.



Bisher hat man, um das Eindringen des Wassers in die Fugen hinter die Werkstücke zu verhindern, die Rückseite der letzteren mit Teer, Asphalt, Goudron usw. bestrichen; indessen haben diese Mittel nicht den gewünschten Erfolg, weil sie von den Alkalien der Mörtel angegriffen und zerstört werden und infolgedessen nicht mehr wasserabsaugend wirken.

Um die Behauptung Nußbaums, soweit sie die Erhärtung der Kalkmörtel betraf, nachzuprüfen und den Einfluß des Zusatzes von Magermilch auf das Erhärtungsvermögen von Luftkalkmörtel zahlenmäßig festzustellen, wurden vergleichende Versuche mit Kalkmörtel, der nur mit Wasser angemacht, und solchem, dem Magermilch in verschiedenen Mengen zugesetzt war, ausgeführt.

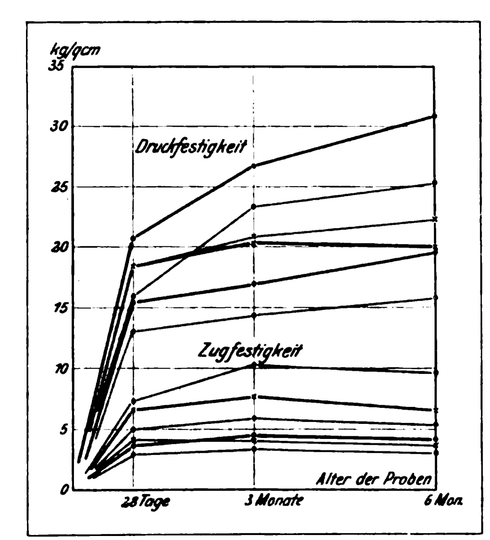


Fig. 71.
Festigkeit von Kalkmörtel ohne und mit Magermilchzusatz. Werte nach Tab. 106.
— 1 Gewichtteil Kalkteig + 3 Gewichtteil Mauersand. — Kalkmörtel von einem Berliner Mörtelwerk. • Mörtel mit Wasser angemacht. o Mörtel mit 5% Magermilch. × Mörtel mit 10% Magermilch.

Versuchsreihe 1.

Die Versuche der Reihe 1 umfaßten zwei Mörtel, einen, der im Laboratorium aus 1 Gewichtsteil Kalkteig + 3 Gewichtsteilen Mauersand hergestellt war, und einen anderen, der fertig von einem Berliner Mörtelwerk bezogen war. Je einem Teil der beiden Mörtel wurden 5 und 10 % Magermilch aus dem Handel zugesetzt. Aus den drei verschiedenen Anmachungen jeder Mörtelart wurden Zug- und Druckproben in der üblichen Weise hergestellt und nach 28, 90 und 180 Tagen Luftlagerung geprüft. Die im Mittel aus je fünf Einzelversuchen gewonnenen Ergebnisse der Raumgewichtsbestimmung und der Festigkeitsprüfung sind in Tab. 106 verzeichnet und letztere gleichzeitig in Fig. 71 zeichnerisch dargestellt.

Aus den Raumgewichten ist ersichtlich, daß der Zusatz von Magermilch den Dichtigkeitsgrad herabgesetzt hat, und zwar in dem Grade des Zusatzes. Ähnlich, wenn auch nicht der Veränderung der Dichtigkeitsverhältnisse mit wachsendem Milchzusatz entsprechend, ist der Unterschied in den Festigkeitsziffern.

Die Mörtel mit beiden Milchzusätzen lieferten geringere Festigkeiten, als die reinen Kalkmörtel; indessen ergaben die Mörtel mit 10% Magermilch durchschnittlich günstigere Ergebnisse, als diejenigen mit 5 % Milchzusatz. Eigentümlicherweise ist die Wirkung des Milchzusatzes bei dem fertig angerichteten Mörtel eine weniger ungünstige, als bei dem in dem Amt hergestellten Mörtel.

Nach diesem Prüfungsbefund wurde die Festigkeit des Luftkalkmörtels durch Milchzusatz nicht, wie erwartet werden sollte, gesteigert, sondern herabgemindert; die Behauptung Nußbaums schien also durch den vorliegenden Prüfungsbefund nicht bestätigt. Es war jedoch nicht ausgeschlossen, daß das ungünstige Ergebnis darauf zurückzuführen war, daß die gewählten Zusätze von

Magermilch zu gering bemessen waren und vielleicht bei ausgiebigeren Zusätzen zum Kalkmörtel die behauptete Verbesserung erzielt worden wäre.

Diese Auffassung wurde durch die Ergebnisse einer weiteren Versuchsreihe bis zu einem gewissen Umfange bestätigt.

Einfluß des Zusatzes von Magermilch zu Kalkmörtel auf dessen Erhärtung.

Tab. 106. **Raumgewichte und Festigkeiten.** (Siehe Fig. 71.)

Versuchsreihe 1.

Mittelwerte aus je fünf Einzelversuchen.

Mörtelmischung	1 Gewichtteil Kalkteig (Kalk aus Schlesien) + 3 „ Mauersand								Kalkmörtel bezogen von einem Berliner Mörtelwerk							
Art des Anmachens	Zugproben				Druckproben				Zugproben				Druckproben			
	3 Tage	28 Tage	3 Mon.	6 Mon.	3 Tage	28 Tage	3 Mon.	6 Mon.	3 Tage	28 Tage	3 Mon.	6 Mon.	3 Tage	28 Tage	3 Mon.	6 Mon.
Raumgewicht g/ccm.																
Mit Wasser	2,157	2,128	2,157	2,157	2,110	1,997	2,017	2,028	2,128	2,099	2,099	2,114	2,068	1,955	1,969	1,980
Mit 5% Magermilch	2,128	2,085	2,085	2,099	2,017	1,916	1,932	1,941	2,085	2,085	2,085	2,099	2,045	1,927	1,941	1,947
Mit 10% Magermilch	2,099	2,055	2,070	2,070	2,062	1,927	1,932	1,935	2,085	2,070	2,070	2,085	2,008	1,918	1,927	1,932
Festigkeit kg/qcm																
Mit Wasser	—	7,1	10,3	9,7	—	20,3	26,3	30,6	—	5,0	5,9	5,3	—	15,9	23,3	25,2
Mit 5% Magermilch	—	3,7	4,5	4,1	—	15,4	16,9	19,3	—	2,9	3,4	3,0	—	13,0	14,4	15,8
Mit 10% Magermilch	—	6,6	7,6	6,5	—	18,2	20,4	19,7	—	4,0	4,2	3,8	—	18,4	20,6	22,3

Versuchsreihe 2.

Aus Kalkhydratpulver und Mauersand (Freienwalder Rohsand) wurden Mörtel im Verhältnis 1:3 nach Raumteilen hergestellt, und zwar unter Verwendung folgender Anmacheflüssigkeiten:

a) Wasser,
b) $^{1}/_{2}$ Teil Wasser + $^{1}/_{2}$ Teil Milch,
c) Milch.

Der Flüssigkeitsanspruch betrug zur Erzielung erdfeuchter Mörtelsteife in allen Fällen 8,5%. Das Kalkpulver war auf dem 120 Maschensiebe abgesiebt; die Milch als Magermilch aus dem Handel beschafft.

Die Verwendung von Kalkhydrat in Pulver- statt in Teigform geschah auf Grund der gemachten Erfahrungen aus besonderen Gründen. Bei Benutzung von Kalkteig, der meist mehr als 50% Wasser enthält, muß der daraus mit geringen oder mittleren Sandzusätzen bereitete Mörtel bekanntlich, um die für das Einschlagen erforderliche erdfeuchte Beschaffenheit zu erlangen, auf Gipsplatten abgesaugt werden. Wäre nun der Mörtel mit Kalkteig angemacht und ihm dann

noch Milch zugesetzt worden, so wäre er noch feuchter geworden, als er bereits ohnedem war, und man hätte ihn durch Absaugen wieder auf den richtigen Feuchtigkeitsgrad bringen müssen, wobei nicht ausgeschlossen war, daß auch Teile der Milch mit abgesaugt wurden.

Durch die Verwendung von Kalkpulver wurde also das lästige und zeitraubende Absaugen vermieden, und man hatte außerdem bei der Reihe, für die der Mörtel mit reiner Milch angemacht werden sollte, die volle Gewißheit, daß eben nur Milch im Mörtel als Anmacheflüssigkeit enthalten war.

Aus den Mörteln wurden Zug- und Druckproben für drei Altersstufen (28 Tage, 3 und 6 Monate) normengemäß hergestellt:

Aus den bei der Prüfung gewonnenen Ergebnissen (Tab. 107 u. Fig. 72) geht folgendes hervor:

Die mit Wasser angemachten Proben haben höheres r, als die mit 1/2 Teil Wasser + 1/2 Teil Milch und die mit reiner Milch angemachten.

Tab. 107. **Raumgewicht und Festigkeit des Mörtels aus 1 Raumteil Kalkpulver + 3 Raumteil Freienwalder Rohsand.**

Versuchsreihe 2.

Analyse des Kalkes siehe Tab. 41 (Reihe 2).
Eigenschaften der Mörtelstoffe siehe Tab. 42 (Reihe 2).

Mittelwerte aus je fünf Einzelversuchen.

Anmacheflüssigkeit (Höhe d. Zusatzes %)	Zugproben				Druckproben				Verhältnis Zug : Druck		
	3 Tage	28 Tage	3 Mon.	6 Mon.	3 Tage	28 Tage	3 Mon.	6 Mon.	28 Tage	3 Mon.	6 Mon.
Raumgewicht g/ccm											
Wasser (8,5 %)[1]	2,029	2,034	2,029	2,043	2,068	1,966	1,972	1,980	—	—	—
1/2 Tl. Wasser + 1/2 Tl. Milch (8,5 %)[2]	2,014	1,986	1,971	1,986	2,017	1,935	1,932	1,930	—	—	—
Milch (8,5 %)[3]	2,014	2,000	1,986	2,000	2,051	1,963	1,961	1,963	—	—	—
Festigkeit kg/qcm											
Wasser	—	4,0	5,4	5,6	—	7,7	11,0	16,5	$\frac{1}{1,9}$	$\frac{1}{2,0}$	$\frac{1}{3,0}$
1/2 Tl. Wasser + 1/2 Tl. Milch	—	6,0	6,7	7,5	—	17,5	18,9	22,4	$\frac{1}{2,9}$	$\frac{1}{2,8}$	$\frac{1}{3,0}$
Milch	—	9,4	5,9	8,0	—	28,3	30,9	31,2	$\frac{1}{3,0}$	$\frac{1}{5,2}$	$\frac{1}{3,9}$
Verhältniszahlen; Festigkeit der mit Wasser angemachten Proben = 100.											
1/2 Tl. Wasser + 1/2 Tl. Milch	—	150	124	134	—	227	171	136	—	—	—
Milch	—	335	101	143	—	368	281	189	—	—	—

1) 1 l Mörtel mit 17 % Wasser mauergerecht angemacht wog: 1,966 kg
2) 1 l „ „ 14,0 % 1/2 Wasser + 1/2 Milch mauergerecht angemacht „ 1,878 „
3) 1 l „ „ 14,0 % Milch mauergerecht angemacht „ 1,912 „

Der Mörtel mit Milchzusatz hat höhere Festigkeit geliefert, als der mit Wasser angemachte; am günstigsten wirkt der Zusatz von reiner Milch.

Am größten sind die Festigkeitsunterschiede bei den frischen Proben (28 Tagen); mit zunehmendem Alter wird dieser Unterschied geringer, weil die Festigkeit der mit Milch oder mit Milch und Wasser angemachten Mörtel nur langsam fortschreitet. Der Grad der Festigkeitsveränderung ist aus den Verhältniszahlen (Tab. 107) ersichtlich.

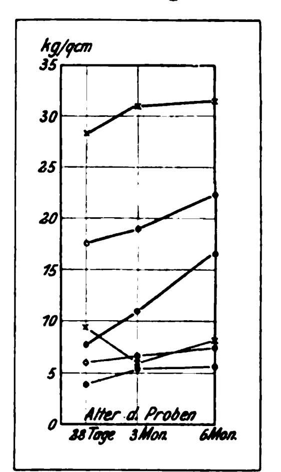


Fig. 72.
Festigkeit des Mörtels 1 + 3 nach Tab. 107.
• Mit Wasser angemacht.
o Mit 1/2 Wasser + 1/2 Milch angemacht. × Mit Milch angemacht.

Der Rückgang der mit reiner Milch bereiteten Proben in der Zugfestigkeit von 28 Tagen zu 3 Monaten ist nicht erklärlich, um so weniger, als die Zugprobekörper dieser Reihe äußerliche Veränderungen irgend welcher Art nicht zeigten und im übrigen die Druckproben in der Erhärtung normal fortschreiten.

Es ist indes nicht ausgeschlossen, daß das Kalkpulver nicht völlig abgelöscht war und die daraus hergestellten Mörtel infolgedessen nachher Neigung zum Treiben aufwiesen. Die hierdurch hervorgerufenen Spannungen wirken natürlich in den Zugproben schädlicher, als in den Druckproben und kommen in dem Ergebnis des Zugsversuches mehr zum Ausdruck, als in dem des Druckversuches; denn erstens sind die Zugprobekörper infolge verhältnismäßig höherer Schlagarbeit (vergl. die Ergebnisse der Versuche über den Einfluß der Schlagarbeit in Tab. 43 S. 78) stärker verdichtet, als die Druckprobekörper (vergl. die Raumgewichtswerte in Tab. 106 und 107), und zweitens wirkt auch die Treibspannung im Sinne der Beanspruchung beim Zugversuch, während sie der beim Druckversuch ausgeübten entgegenwirkt.

Um festzustellen, ob bei den mit Milch angemachten Mörteln, ebenso wie bei den wie gewöhnlich mit Wasser angemachten Kohlensäureaufnahme stattfindet und in welchem Grade, und wie diese mit fortschreitendem Alter verläuft, wurden bei jeder Altersstufe Reste der Festigkeitsprobekörper auf Gehalt an Kohlensäure untersucht.

Aus den hierbei gewonnenen Ergebnissen (Tab. 108) erhellt,

daß die Kohlensäureaufnahme der Milchproben im Vergleich zu der der Wasserproben sehr gering ist. Sie scheint auch mit zunehmendem Alter kaum wesentlich mehr fortzuschreiten.

Tab. 108. **Kohlensäuregehalt der Körper zu Tab. 107.**

Anmacheflüssigkeit	Probe, entnommen	Gehalt an Kohlensäure in % nach		
		28 Tagen	3 Monaten	6 Monaten
Wasser	vom Rande	1,99	3,19	3,31
1/2 Wasser + 1/2 Milch		0,73	2,15	1,58
Milch		0,83	1,10	0,96
Wasser	aus der Mitte	0,28	1,10	1,06
1/2 Wasser + 1/2 Milch		0,26	0,18	0,39
Milch		0,33	0,25	0,50

Durch den Prüfungsbefund der Versuchsreihe 2 war nun allerdings bewiesen, daß in Übereinstimmung mit der Nußbaumschen Behauptung die Festigkeit von Luftkalkmörtel, der erdfeucht angemacht und durch Einschlagen stark verdichtet ist, durch Zusatz von Magermilch verbessert wird, mit der Einschränkung allerdings, daß diese Verbesserung nur bei ausreichendem Milchzusatz stattfindet.

Eine weitere Frage war nun die, ob dies Ergebnis auch auf die praktischen Verhältnisse anwendbar ist, d. h. ob auch mauergerecht angemachter Mörtel in gleichem oder ähnlichem Grade verbessert und ferner, ob und in wie weit die Mauerwerksfestigkeit durch Mörtel mit Milchzusatz beeinflußt wird. Über diese Fragen sollten folgende Versuche Aufschluß geben.

Versuchsreihe 3.

Festgestellt sollte werden:

a) Die Festigkeit von Kalkmörtel, der unter Zusatz von
 - α) Wasser,
 - β) $^1/_2$ Teil Wasser + $^1/_2$ Teil Milch,
 - γ) Milch

 in mauergerechter Steife angemacht war.

b) Die Druckfestigkeit von Mauersteinkörpern, die unter Verwendung von Mörtel unter a) α—γ aus je zwei Steinhälften zusammengemauert waren, im Vergleich zur Druckfestigkeit von Körpern, die, wie üblich, in reinem Portlandzement vermauert waren.

c) Die Scherfestigkeit (Haftfestigkeit) der Mörtel unter a) α—γ.

Das Probematerial zu diesen Versuchen bestand aus:

1. Portlandzement normaler Beschaffenheit,
2. Kalkpulver aus Luftkalk, }
3. Mauersand, } wie zu Versuchsreihe 2 benutzt.
4. Wasser und Milch, }
5. roten gebrannten Tonziegeln aus dem Handel als Rathenower Mauersteine bezogen,
6. hellgrauen Kalksandsteinen.

Aus diesen Materialien wurden folgende Probekörper hergestellt:

a) Mörtelwürfel normaler Abmessung aus der Mischung 1 Raumteil Kalkpulver + 3 Raumteile Mauersand, und zwar mit:
 - α) Wasser, }
 - β) $^1/_2$ Teil Wasser + $^1/_2$ Milch, } mauergerecht angemacht.
 - γ) Milch, }

b) Druckprobekörper aus je zwei Steinhälften
 - α) nach dem üblichen Verfahren mit Mörtel aus reinem Portlandzement (Fig. 37 S. 114),
 - β) mit Kalkmörtel der Anmachungen unter a) α—β zusammengemauert (Fig. 37 S. 114),

c) Druckprobekörper als Würfel aus den Steinen geschnitten,

d) Scherprobekörper, bestehend aus je zwei ganzen Steinen, die nach Maßgabe der Fig. 68 mit den Kalkmörteln a) α—β aufeinandergemauert waren.

Zu a). Die mauergerecht angemachten Mörtel wurden in die auf geebneten Dachziegeln stehenden Formen eingefüllt und die Körper nach drei Tagen entformt.

Hierbei stellte sich heraus, daß die mit Milch bezw. mit verdünnter Milch angemachten Proben weniger glatte Flächen und weniger scharfe Kanten hatten,

als die mit Wasser angemachten, welche Erscheinung wahrscheinlich darauf zurückzuführen ist, daß die Körper mit Milchzusatz ihre Anmacheflüssigkeit (infolge deren Fettgehaltes) schlechter an die absaugende Unterlage abgegeben hatten und daher auch weniger verdichtet wurden, als die Mörtel mit Wasserzusatz.

Zu b). Die Druckkörper zur Ermittelung der Körperfestigkeit wurden aus den auf der Steinsäge geschnittenen Steinhälften wie üblich gefertigt. Die Fugendicke betrug etwa 1 cm; die Druckflächen wurden mit Zementmörtel 1 : 1 abgeglichen.

Zu c). Die Würfel wurden aus den Steinen herausgeschnitten und diejenigen aus den Ziegeln auf den Druckflächen abgeglichen. Das Abgleichen der Druckflächen der Kalksandsteinwürfel war nicht erforderlich.

Zu d). Die Körper für die Scherversuche wurden bei etwa 1,5 cm Dicke der Fuge unter Verwendung der zu prüfenden Kalkmörtel aufeinandergemauert und behufs Nachahmung des in der Praxis wirkenden Druckes der aufliegenden Mauerschicht der obere Stein jedes Versuchsstückes mit einem Gewichtsstück von 5 kg Gewicht (d. i. 0,01 kg/qcm) bis zum erfolgten Abbinden des Mörtels beschwert.

Sämtliche Proben lagerten an der Luft im Zimmer. Ihre Prüfung erfolgte bei 28 Tagen Alter. Die gewonnenen Ergebnisse sind in Tab. 109 bis 113 zusammengestellt und in diesen auch die näheren Angaben über die Höhe des Wasser- bezw. Milchzusatzes, die Abmessungen der Versuchsstücke und die bei der Versuchsausführung gemachten Beobachtungen (Verhalten des Fugenmörtels, Art der Zerstörung usw.) enthalten.

Einfluß von Magermilchzusatz zu Kalkmörtel auf die Körperfestigkeit von Ziegel- und Kalksandsteinen.

Tab. 109. **Eigenschaften der Mörtelstoffe.**

Versuchsreihe 3.

Eigenschaften des Kalkes (Kalkpulvers) und Mauersandes s. Tab. 41 u. 42 (Reihe 2).
Der Zement war normaler Portland-Zement.
Rathenower Mauersteine aus dem Handel und Kalksandsteine unbekannter Herkunft.

Tab. 110. **Druckfestigkeit des Kalkmörtels verschiedener Anmachung.**

Würfel von 7,1 cm Kantenlänge; gedrückte Fläche = 50 qcm. Alter der Proben: 28 Tage.

Mörtelmischung (Raumteile)	Kalkmörtel aus 1 Kalkpulver + 3 Mauersand, angemacht mit			Bemerkungen
	Wasser	1/2 Tl. Milch + 1/2 Tl. Wasser	Milch	
Zusatz an Anmacheflüssigkeit %	17,6	17,2	16,7	
Versuch Nr.	Druckfestigkeit σ_{-B} in kg/qcm			
1	6,2	2,3	7,2	Die mauergerecht angemachten Mörtel wurden in die auf geebneten Ziegeln stehenden Formen eingefüllt. Die Körper wurden nach zwei Tagen entformt[1]) und lagerten im Probenlager an der Luft.
2	5,8	2,7	7,9	
3	4,8	2,6	7,9	
4	4,8	2,6	7,7	
5	5,1	2,5	8,0	
Mittel	**5,3**	**2,5**	**7,7**	

[1]) Die mit Wasser angemachten Kalkmörtel-Probekörper hatten glattere Druckflächen und schärfere Kanten, als die mit Milch bezw. mit verdünnter Milch angemachten, wie sich schon beim Entformen herausstellte. Diese Erscheinung hatte vermutlich darin ihren Grund, daß der mit Wasser angemachte Mörtel beim Absaugen auf den Ziegeln das Wasser schneller und vollkommener abgab, als die beiden anderen Mörtel ihre Anmacheflüssigkeit.



Tab. 111. Ergebnisse der Prüfung auf Körper- und Materialfestigkeit.

Mittlere Abmessungen der { Rathenower Steine 25,0 . 12,0 . 6,5 cm / Kalksandsteine 25,0 . 12,0 . 6,5 cm }

Mittlere Abmessungen der Versuchsstücke aus { Rathenower Steinen 12,0 . 12,0 . 16,7 cm / Kalksandsteinen 12,0 . 12,0 . 15,7 cm }

Gedrückte Fläche im Mittel 144 qcm; mittlere Fugendicke 1 cm.

Alter der zusammengemauerten Proben: 28 Tage; Lagerung: an der Luft im Zimmer.

Mittlere Abmessungen der geschnittenen Würfel aus { Rathenower Steinen 6,5 . 6,5 . 6,5 cm[1]); gedrückte Fläche 42,3 qcm[1]) / Kalksandsteinen 6,6 . 6,6 . 6,6 cm[2]); „ „ 43,6 qcm[2]) }

Art der Versuchsstücke	Körper aus je zwei Steinhälften, zusammengemauert mit							Aus den Steinen herausgeschnittene Würfel	Bemerkungen
	reinem Zement	Kalkmörtel, angemacht mit: Wasser		½ Wasser + ½ Milch		reiner Milch			
	Belastung für								
Versuch Nr.	Zerstörung[3]) kg	Beginn des Ausbröckelns des Mörtels aus den Fugen t	Zerstörung[3]) kg	Beginn des Ausbröckelns des Mörtels aus den Fugen t	Zerstörung[3]) kg	Beginn des Ausbröckelns des Mörtels aus den Fugen t	Zerstörung[3]) kg	Belastung für Zerstörung[3]) kg	
Rathenower Mauersteine									
1	30 000	9	21 500	10	22 600	19	30 500	10 830	Die mit reinem Zement gemauerten Körper gingen wie üblich zu Bruch. Bei den mit Kalk gemauerten Körpern begann bei einer gewissen Belastung, deren Höhe selbst nicht für die Körper derselben Reihe genau festgestellt werden konnte, die jedoch bei den weniger festen Kalksandsteinen näher der Bruchlast lag, als bei den etwas festeren gebrannten Ziegeln, der Fugenmörtel auszubröckeln. Soweit als möglich, ist dieser Augenblick beobachtet und die Laststufe vermerkt worden. Das Ausbröckeln oder vielmehr Herausrieseln des Mörtels dauerte fast bis zum Eintritt völliger Zerstörung der Körper. Der Bruch erfolgte, ohne daß vorher sichtbare Rißbildung eintrat, mit nur vereinzelten Ausnahmen in einer Steinhälfte, während die andere ungestört blieb. Der Bruchverlauf in der zerstörten Steinhälfte war bei den Rathenower Ziegeln etwa wie der in Fig. 73, bei den Kalksandsteinen etwa wie der in Fig. 74 veranschaulichte.
2	20 800	10	13 400	8,5	14 150	15	21 500	10 350	
3	22 200	8	21 200	7,5	20 200	11	23 350	10 300	
4	27 300	10,5	17 350	8	18 150	9,5	20 000	9 600	
5	20 000	7,5	13 800	8	17 350	12,5	19 550	9 650	
6	28 200	7	13 900	7	24 850	11,5	19 900	9 430	
7	26 700	9	19 650	9	13 950	11	24 400	9 030	
8	22 500	7,5	15 650	9,5	17 250	10	20 100	9 690	
9	30 100	7	15 700	11	17 250	10,5	19 300	10 360	
10	31 000	6	16 050	9	12 200	9,5	15 450	9 840	
Mittel	25 880	8,2	16 820	8,8	17 795	12,0	21 405	9 908	
Mittlere Druckfestigkeit σ_{-B} in kg/qcm	**180**	—	**117**	—	**124**	—	**149**	**234**	
Kalksandsteine									
1	17 500	8,5	10 050	7,5	11 300	11,5	12 800	5 550	
2	14 400	9	10 500	8	11 900	13,5	14 500	5 500	
3	17 800	8	9 800	8	10 150	10,5	12 650	5 200	
4	15 850	9	11 600	9,5	12 650	9	10 600	5 560	
5	18 550	10,5	13 900	9	11 800	13	17 050	5 480	
6	14 500	8,5	11 950	8	9 500	10,5	11 150	4 910	
7	16 000	8	12 300	8	10 050	10	11 000	5 340	
8	13 400	8	10 600	9,5	10 950	8,5	9 850	5 100	
9	17 000	9	13 800	12	12 650	8,5	10 600	4 900	
10	16 550	10	14 800	11	12 200	9,5	12 500	4 750	
Mittel	16 155	8,9	11 930	9,1	11 315	10,5	12 270	5 229	
Mittlere Druckfestigkeit σ_{-B} in kg/qcm	**112**	—	**83**	—	**79**	—	**85**	**120**	

1) Als Druckflächen wurden diejenigen Seitenflächen der Würfel benützt, die in der Ebene der Lagerflächen der ganzen Steine gelegen hatten (siehe Fig. 39 S. 114). Die Druckflächen der Würfel wurden durch Schleifen geebnet.

2) Als Druckflächen wurden die Seitenflächen benutzt, die in der Ebene der Lagerflächen der ganzen Steine gelegen hatten (siehe Fig. 39 S. 114). Da diese genügend eben waren, wurde das Abschleifen der Druckflächen nicht erforderlich.

3) Risse und Zerstörung fielen zusammen; auch bei den mit Kalkmörtel zusammengemauerten Körpern, obgleich der Zerstörung schon bei geringer Belastung Ausbröckeln des Mörtels aus der Fuge voranging. Nur in der Reihe Körper aus Rathenower Ziegeln mit Wassermörtel trat in drei Fällen etwa 200 bis 300 kg vor dem Bruch Rißbildung in einer Steinhälfte ein.

Aus den Ergebnissen geht hervor, daß:

1. Die Druckfestigkeit der mauergerecht angemachten Kalkmörtel erheblich geringer ist, als die der erdfeucht eingeschlagenen Würfel der entsprechenden Mischung (Versuchsreihe 2, Tabelle 107); Verhältnis 5,3 : 2,5 : 7,7 = 7,7 : 17,5 : 28,3.
2. Die Festigkeit des mit verdünnter Milch angemachten Mörtels geringer, die des mit reiner Milch angemachten höher ausgefallen ist, als die des mit Wasser angerührten.
3. Die mit Kalkmörtel vermauerten Steinkörper geringere Festigkeiten ergeben haben, als die mit reinem Zement vermauerten, und zwar für beide Steinsorten. Diese verhalten sich jedoch im vorliegenden Falle dem Mörtel mit Milchzusatz gegenüber verschieden. Während nämlich bei den Rathenower Steinen der mit Milch angemachte Mörtel die Festigkeit gegenüber dem mit Wasser angemachten verbessert, und zwar zunehmend mit steigendem Milchzusatz, bleibt die Festigkeit der Kalksandsteinkörper durch das Vermauern mit Milchmörtel unbeeinflußt. Dieser verschiedene Einfluß ist vermutlich auf den verschiedenen Grad der Porosität und Absaugefähigkeit der beiden Steinsorten zurückzuführen.

   Genauer sind die Unterschiede der Körperfestigkeit (Körper mit reinem Zement vermauert) gegenüber der Druckfestigkeit der mit Kalkmörtel verschiedener Anmachung vermauerten Proben aus den Verhältniszahlen in Tab. 112 ersichtlich.
4. Die Scherfestigkeit des Mörtels mit verdünnter Milch ($^1/_2 + ^1/_2$) nicht höher ist, als die des Wassermörtels (bei den Kalksandsteinen sogar etwas niedriger), während die des mit reiner Milch angemachten Mörtels bei beiden Steinsorten erheblich größer ist, nahezu um das Doppelte (Tab. 113).

Tab. 112. **Mittelwerte und Verhältniszahlen nach Tab. 111.**

Steinsorte	Körper, zusammengemauert mit				Aus den Steinen herausgeschnittene Würfel
	reinem Zement	Kalkmörtel, angemacht mit			
		Wasser	$^1/_2$ Wasser + $^1/_2$ Milch	Milch	
Mittlere Druckfestigkeit in kg/qcm.					
Rathenower Ziegel .	180	117	124	149	234
Kalksandsteine . .	112	83	79	85	120
Verhältniszahlen; Festigkeit der mit Zement vermauerten Körper = 100.					
Rathenower Ziegel .	100	65	69	83	130
Kalksandsteine . .	100	74	70	76	107



Tab. 113. Ergebnisse der Prüfung der Kalkmörtel verschiedener Anmachung auf Scherfestigkeit.

Mittlere Fugendicke: 1,5 cm. Mittlere Haftfläche 22,5 . 12,0 cm = 270 qcm. Alter der Versuchsstücke: 28 Tage. Lagerung: An der Luft im Zimmer.

Versuch Nr.	Kalkmörtel 1 : 3, angemacht mit			Bemerkungen
	Wasser[1]	1/2 Tl. Wasser + 1/2 Tl. Milch[1]	Milch[1]	
	Bruchlast in kg			
Rathenower Ziegelsteine				Der Mörtel wurde in der Fuge abgeschert. Der größere Teil des Fugenmörtels haftete an demjenigen Stein, der beim Aufeinandermauern der Steine unten gelegen hatte. Bei den mit *) versehenen Proben wurde der Mörtel stellenweise von dem anderen Steine losgerissen. Bei den übrigen Proben zeigte der Stein, der beim Vermauern oben gelegen hatte, an den Rändern der Fuge fast gar keinen oder nur sehr wenig Mörtel (siehe Fig. 75).
1	245	205	370	
2	140 *)	200	310	
3	205	205	380	
4	170 *)	190	400	
5	195 *)	260	360	
Mittel	191	212	364	
Mittlere Haftfestigkeit σ_{-B} in kg/qcm	**0,7**	**0,8**	**1,3**	
Kalksandsteine				
1	245 *)	140	330	
2	190 *)	130	410	
3	125 *)	160	380	
4	180 *)	135	270	
5	150 *)	165	370	
Mittel	178	146	352	
Mittlere Haftfestigkeit σ_{-B} in kg/qcm	**0,7**	**0,5**	**1,3**	

Nach diesen Ergebnissen ist der Einfluß des Milchzusatzes auf die Festigkeit von Mörtel, der mauergerecht, also wie in der Praxis üblich, verarbeitet ist, unwesentlich; er ist nur merklich, wenn der Mörtel nur mit Milch und ohne jeglichen Wasserzusatz angemacht wird.

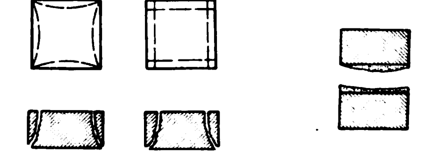


Fig. 73. Fig. 74. Fig. 75.

In Übereinstimmung hiermit steht das Ergebnis der Druckversuche mit Steinkörpern, wenigstens, soweit der gebrannte Tonziegel in Betracht kommt. Bei den Kalksandsteinen ist überhaupt kein nennenswerter Einfluß wahrzunehmen.

Die Scherfestigkeit des Mörtels wird ebenfalls nur erhöht, wenn der Mörtel mit reiner Milch gemischt wird. Verdünnte Milch hat entweder keinen Einfluß oder wirkt sogar schädlich auf diese Art Festigkeit.

1) Der Zusatz an Flüssigkeit beim Anmachen der Mörtel war derselbe, wie bei der vorhergehenden Versuchsreihe. Die Probekörper wurden bis zum Abbinden des Mörtels mit einem 5 kg-Gewicht beschwert.

Aus dem gesamten Prüfungsbefund läßt sich allgemein folgern, daß die Festigkeit und Tragfähigket von Mauerwerk durch Verwendung von Milchmörtel erhöht werden kann, vorausgesetzt, daß zum Anmachen nur reine Milch benutzt wird.

Versuchsreihe 4.

Um festzustellen, ob die Festigkeit des Milchmörtels eine nur äußerliche ist und nur auf Oberflächenerhärtung beruht, oder ob solcher Mörtel in allen Teilen gleich fest ist, war folgender Versuch in Aussicht genommen.

Aus Milchmörtel sollte ein großer Würfel (30 cm Kantenlänge) hergestellt, dieser bei 28 Tagen Alter in einzelne kleinere Würfel zerlegt und jeder einzelne Würfel auf Druck geprüft werden. Man gewann auf diese Weise Körper, von denen mehrere mit drei, einige mit zwei, einige mit einer und einige mit keiner Seite vorher mit der Luft in Berührung gekommen waren.

Ein Würfel von 30 cm Seitenlänge wurde auch für den genannten Zweck aus Kalkmörtel 1 : 3, der mit verdünnter Milch angerührt war, gefertigt (erdfeucht gestampft). Indes schlug der Versuch, den Würfel, wie beabsichtigt, nach 28 Tagen in kleinere würfelförmige Körper zu schneiden, fehl; der äußerlich harte und feste Würfel war im Inneren so mürbe und locker, daß sich trotz größter Vorsicht beim Schneiden brauchbare Druckproben nicht gewinnen ließen.

Versuchsreihe 5.

Schließlich wurde der Milchmörtel im Vergleich zu Wassermörtel auch noch auf die behauptete Wasserabweisungsfähigkeit geprüft, indem:

1. die Wasseraufnahme und -abgabe der Mörtel und
2. die Wasserdichtigkeit der Mörtelaußenfläche

ermittelt wurde.

Hierzu dienten die für die letzte Altersstufe (6 Monate) der Reihe 3 bestimmten Mörtelwürfel.

Zu 1. Je drei Würfel der verschiedenen Anmachungen (Wasser, $^1/_2$ Wasser + $^1/_2$ Milch, Milch) wurden bei drei Monaten Alter[1]) gewogen und so lange unter Wasser gelegt, bis keine Gewichtszunahme mehr stattfand, und hierauf so lange an der Luft gelagert, bis ebenfalls wieder Gewichtsgleichheit der Proben eingetreten war.

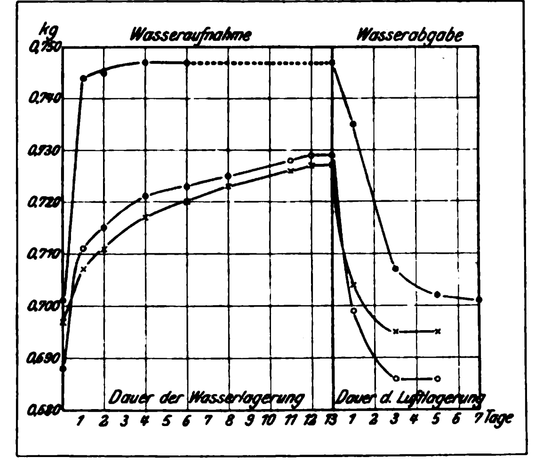


Fig. 76.
Wasseraufnahme und Wasserabgabe von Luftkalkmörtel verschiedener Anmachung (Wasser und Milch). Mittelwerte nach Tab. 114.
• Mit Wasser angemachter Mörtel. o Mit $^1/_2$ Wasser + $^1/_2$ Milch angemachter Mörtel. × Mit Milch angemachter Mörtel.

Zu 2. Auf je zwei Würfel der verschiedenen Anmachungen wurden geteilte Glasröhren von 35 mm lichter Weite wasserdicht aufgekittet und bis zu einem gewissen Teilstrich (25 cm hoch) mit Wasser gefüllt.

---

[1]) Für die Wasseraufnahmeversuche wurden mit Absicht ältere Proben gewählt, um sicher zu sein, daß genügende Oberflächenerhärtung eingetreten und Zerfallen der Körper bei der Wasserlagerung nicht zu befürchten war.

Die Ergebnisse der Prüfung auf Wasseraufnahme und -abgabe sind in Tab. 114 zusammengefaßt und in Fig. 76 zeichnerisch dargestellt.

Wie aus der Tabelle und aus dem Verlauf der Schaulinien ersichtlich ist, nehmen die mit Wasser angemachten Mörtelproben das Wasser schneller auf und erreichen schneller den wassergesättigten Zustand, als die mit Milch bereiteten.

Ihre prozentuale Wasseraufnahme ist indessen insgesamt nicht wesentlich höher, als die der Milchproben.

Die Wasserabgabe vollzieht sich bei den Wasserproben etwas langsamer, als bei den Milchproben.

Tab. 114. Ergebnisse der Prüfung der mit Wasser usw. angemachten Mörtel auf Wasseraufnahme und -abgabe. (Siehe Fig. 76.)

Versuchsreihe 6.

Drei Monate alte Probekörper. (Würfel der Reihe 3.)

Versuch Nr.	Wasseraufnahme: vor dem Einsetzen in Wasser (lufttrocken)	Wasseraufnahme: Gewicht der Proben in kg nach								Wasserabgabe: Gewicht der Proben in kg nach				Bemerkungen
		1	2	4	6	8	11	12	13	1	3	5	7	
		Tagen Lagerung in Wasser								Tagen Lagerung an der Luft				
Mit Wasser angemachter Mörtel														Auf dem Boden des Gefäßes, in dem die Körper lagerten, bildete sich eine Schicht weißen Schlammes, der sich bei der Analyse als kohlensaurer Kalk ergab. Derselbe entstand aus dem während der Wasserlagerung aus den Körpern auslaugenden u. ausscheidenden und bei der Berührung mit der (Kohlensäure der) Luft in kohlensauren Kalk übergehenden Kalkhydrat. Der kohlensaure Kalk setzte sich infolge seines höheren spezifischen Gewichtes am Boden des Gefäßes ab.
1	0,702	0,741	0,742	0,745	0,745	—	—	—	—	0,733	0,707	0,703	0,702	
2	0,702	0,750	0,751	0,752	0,752	—	—	—	—	0,740	0,709	0,704	0,703	
3	0,699	0,740	0,741	0,745	0,745	—	—	—	—	0,731	0,704	0,700	0,699	
Mittel	**0,701**	**0,744**	**0,745**	**0,747**	**0,747**	—	—	—	—	**0,735**	**0,707**	**0,702**	**0,701**	
Wg[1] %	—	**6,1**	**6,3**	**6,6**	**6,6**	—	—	—	—	**1,6**	**5,4**	**6,0**	**6,2**	
Mit 1/2 Tl. Wasser + 1/2 Tl. Milch angemachter Mörtel														
1	0,688	0,711	0,715	0,720	0,722	0,725	0,727	0,728	0,728	0,697	0,686	0,686	—	
2	0,689	0,712	0,716	0,722	0,724	0,726	0,729	0,731	0,731	0,701	0,687	0,686	—	
3	0,687	0,709	0,714	0,720	0,722	0,724	0,727	0,728	0,728	0,698	0,686	0,685	—	
Mittel	**0,688**	**0,711**	**0,715**	**0,721**	**0,723**	**0,725**	**0,728**	**0,729**	**0,729**	**0,699**	**0,686**	**0,686**	—	
Wg[1] %	—	**3,3**	**3,9**	**4,8**	**5,1**	**5,4**	**5,8**	**6,0**	**6,0**	**4,1**	**6,3**	**6,3**	—	
Mit Milch angemachter Mörtel														
1	0,697	0,707	0,711	0,717	0,720	0,722	0,725	0,726	0,726	0,703	0,695	0,695	—	
2	0,697	0,707	0,711	0,717	0,720	0,723	0,726	0,727	0,727	0,705	0,695	0,694	—	
3	0,697	0,707	0,711	0,717	0,720	0,723	0,726	0,727	0,727	0,703	0,695	0,695	—	
Mittel	**0,697**	**0,707**	**0,711**	**0,717**	**0,720**	**0,723**	**0,726**	**0,727**	**0,727**	**0,704**	**0,695**	**0,695**	—	
Wg[1] %	—	**1,4**	**2,0**	**2,9**	**3,3**	**3,7**	**4,2**	**4,3**	**4,3**	**3,3**	**4,4**	**4,4**	—	

[1]) Wg = Wasseraufnahme in Gewichtsprozent, bezogen auf das Gewicht der lufttrockenen Proben, bezw. Wasserabgabe in Gewichtsprozent, bezogen auf das Gewicht der (scheinbar) wassersatten Proben.

Daß letztere bei der Lagerung an der Luft schließlich geringeres Gewicht aufweisen, als in dem gleichen Zustande bei Beginn des Versuchs, so daß die Wasserabgabe höher ausfällt, als die Wasseraufnahme, hat darin seinen Grund, daß diese mit Milch angemachten Proben bei der Wasserlagerung Kalk ausscheiden (siehe Bemerkungen in Tab. 114).

Bei den Wasserdichtigkeitsversuchen (mit aufgekitteten Röhren) wurde festgestellt, daß innerhalb 24 Stunden durchschnittlich folgende Wassermengen in die Proben eingezogen waren:

a) in die mit Wasser angemachten . . . . 83 ccm,
b) in die mit $^{1}/_{2}$ Wasser + $^{1}/_{2}$ Milch angemachten . . . . 60 ccm,
c) in die mit Milch angemachten . . . . 46 ccm.

Ferner wurde beobachtet, daß innerhalb des genannten Zeitraums bei sämtlichen Proben an den Seitenflächen und an der Unterseite das Wasser tropfenweise heraussickerte.

> Nach vorstehenden Ergebnissen saugen mit Milch angemachte Kalkmörtel Wasser allerdings langsamer auf, als mit Wasser gemischte. Der Unterschied in dem Grade der Wasseraufnahme ist indes nur merklich, wenn zum Anmachen nur reine Milch verwendet wird. Nach vorliegenden Versuchen können daher Milchmörtel nicht als durchaus wasserabweisend oder wasserdicht angesehen werden.

b) Die Erhärtung von verlängertem Zementmörtel und anderen Mörteln bei Luftabschluß.

Nußbaum verwirft, wie bereits oben erwähnt, für Grundmauerwerk und überhaupt für dicke Mauern außer dem Kalkmörtel auch den sogen. verlängerten Zementmörtel, weil solcher ebenfalls unter Luftabschluß schlecht erhärten soll, während man sonst diese Mörtel für alle Zwecke, selbst für Bauten, die zeitweise oder dauernd unter Wasser stehen, mit Erfolg verwendet.

Durch umfassende, vergleichende Prüfungen mit Mörtel bei verschiedener Art der Lagerung (an der Luft und unter Luftabschluß) sollte diese Ansicht Nußbaums übergeprüft werden. Zu diesem Zwecke wurden aus den Materialien

1. Kalkteig aus Luftkalk mit 97,19 % Ätzkalkgehalt,
2. Portlandzement normaler Beschaffenheit,
3. Traßmehl und
4. Mauersand (Freienwalder Rohsand)

verlängerter Zementmörtel, reiner Zementmörtel und Traßkalkmörtel in folgenden Mischungsverhältnissen

a) 1 Raumteil Zement + 6 Raumteil Mauersand + 2 Raumteil Kalkteig
b) 1 „ „ + 6 „ „ + 1 „ „
c) 1 „ „ + 3 „ „
d) 2 „ Kalkteig + 1 „ „ + 3 „ Traß

wie üblich in erdfeuchter Steife bereitet und aus ihnen Zug- und Druckprobekörper normengemäß hergestellt.

Ein Teil der Probekörper jeder Mischung lagerte im Zimmer an der Luft; die übrigen wurden in einen Blechkasten gesetzt und die Hohlräume zwischen den Körpern mit trockenem Sand ausgefüllt, so daß die Luft (Kohlensäure) aus dem Kasten möglichst verdrängt und Kohlensäureerhärtung ausgeschlossen war. Die bis an den Rand mit Sand gefüllten Kästen wurden mit einem Deckel verschlossen



und der Rand zwischen Kasten und Deckel mit Wachs abgedichtet. Sie standen in demselben Raume, in dem auch die Luftproben aufbewahrt wurden.

Die Prüfung erstreckte sich auf die Ermittelung der allgemeinen Eigenschaften der verwendeten Mörtelstoffe und die Feststellung des Gewichtes (Raumgewicht) und der Festigkeitseigenschaften der Mörtel; letztere erfolgte bei 28 Tagen, 3 Monaten, 6 Monaten und 1 Jahr Alter der Probekörper.

Die Ergebnisse sämtlicher Versuche sind in den Tab. 115—119 zusammengefaßt und die der Siebversuche, Raumgewichts- und Festigkeitsprüfungen in Fig. 77 bis 80 veranschaulicht. In den Schaubildern beziehen sich die ausgezogenen Linien auf die an der Luft und die gestrichelten Linien auf die unter Luftabschluß gelagerten Proben.

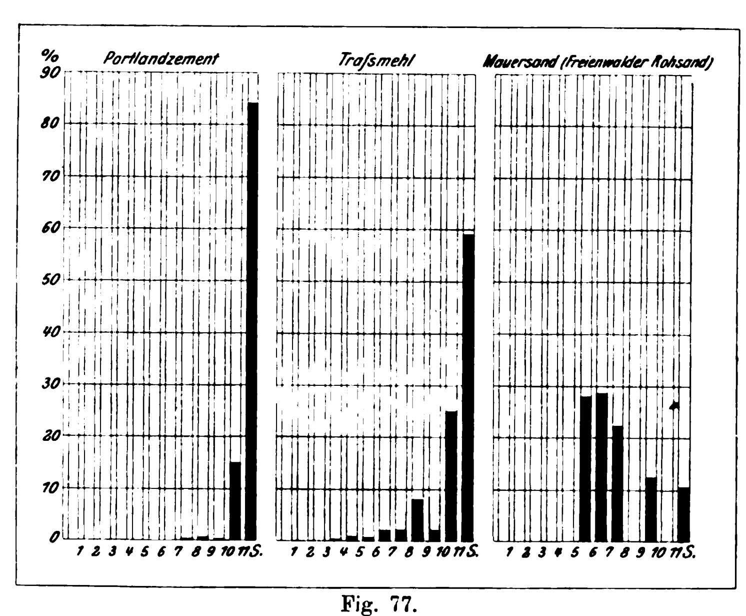


Fig. 77.
Darstellung der Siebrückstände zwischen je zwei Sieben. Werte nach Tab. 117.
Zeichendeutung siehe Fußbemerkung zu Fig. 1 S. 18.

Aus den Raumgewichtswerten ist ersichtlich, daß:

1. die Zugproben sämtlicher Mischungen mit Ausnahme des Traßkalkmörtels höheres r haben, als die Druckproben, ein Ergebnis, das auch den sonstigen Erfahrungen entspricht, da die Zugproben beim Einschlagen mehr verdichtet werden, als die Druckproben;
2. das Raumgewicht bis zu 28 Tagen, abgesehen von den Zugproben einiger Mischungen, abnimmt, und zwar das der an der Luft gelagerten Proben mehr, als das der unter Luftabschluß aufbewahrten;
3. das Raumgewicht der Luftproben von einem gewissen Zeitpunkt an wieder zunimmt (infolge der Kohlensäureaufnahme), während das der vor Luftzutritt geschützten nahezu gleich bleibt.

Die gewonnenen Festigkeitswerte, insbesondere die sie darstellenden Schaulinien (Fig. 80) lassen irgendwelchen schädlichen Einfluß der Verhinderung des Luftzutrittes auf die Erhärtung der Mörtel nicht erkennen, selbst auch nicht bei dem verlängerten Zementmörtel; im Gegenteil scheint nach

den bis jetzt vorliegenden Ergebnissen die Lagerung unter Luftabschluß günstiger auf die Erhärtung zu wirken, als die an der Luft.

In allen Fällen, mit einziger Ausnahme der Zugproben des reinen Zementmörtels, zeigen die unter Luftabschluß aufbewahrten Körper höhere Festigkeit, als die an der Luft gelagerten. Auch der Erhärtungsfortschritt ist bei ersterer Art Lagerung innerhalb der zur Prüfung gelangten Altersgrenzen (1 Jahr) günstiger,

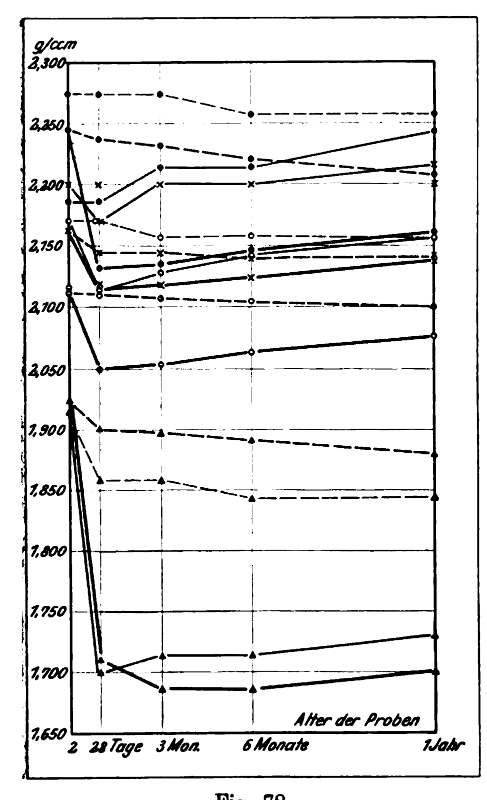
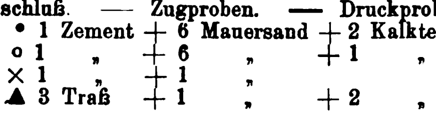


Fig. 78.
Ergebnisse der Raumgewichtsbestimmung nach Tab. 118.
Ausgezogene Linien: Lagerung an der Luft.
Gestrichelte Linien: Lagerung unter Luftabschluß. — Zugproben. **—** Druckproben.



• 1 Zement + 6 Mauersand + 2 Kalkteig.
o 1 „ + 6 „ + 1 „
× 1 „ + 1 „
▲ 3 Traß + 1 „ + 2 „

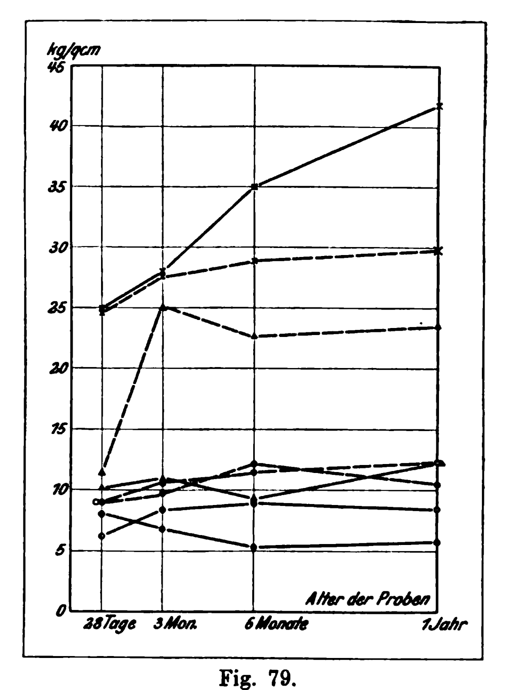


Fig. 79.
Ergebnisse der Zugfestigkeitsversuche.
Mittelwerte nach Tab. 119.
Zeichendeutung wie zu Fig. 78.

als bei der Luftlagerung. Dies zeigt sich besonders auffallend bei den Traßkalkmörtelproben. Letzteres Ergebnis steht in vollem Einklange mit den Ergebnissen der im ersten Abschnitte behandelten Versuche über den Einfluß der Art der Erhärtung von Mörteln mit hydraulischen Zuschlägen.

Der Grad der Festigkeitsveränderung der Mörtel durch die Lagerungsart ist aus den Verhältniszahlen in Tab. 120 ersichtlich.

Nach diesem Prüfungsbefunde kann ein nachteiliger oder gar auf die Dauer schädigender Einfluß des Lagerns

bei Luftabschluß auf das Erhärten von verlängertem Zementmörtel nicht als vorhanden angenommen werden.

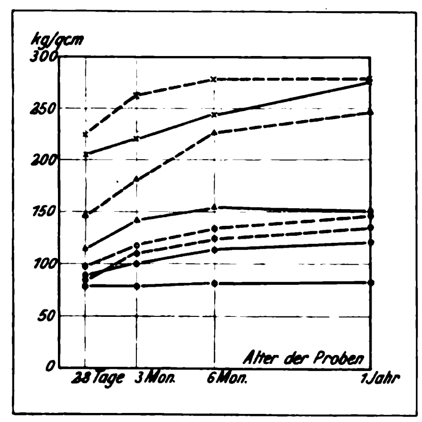


Fig. 80.
Ergebnisse der Druckfestigkeitsversuche. Mittelwerte nach Tab. 119.
Zeichendeutung wie zu Fig. 78.

Erhärtung von Kalk-Zementmörtel, Zement-Kalkmörtel, Zementmörtel und Kalk-Traß-Mörtel bei Luftabschluß.

Tab. 115. **Analyse des Kalkes.**

	(Ermittelt am Kalkteig)	Bezogen auf den geglühten Zustand
Glühverlust	25,22 %	
Kieselsäure und Unlösliches . .	0,58 „	0,78 %
Eisenoxyd und Tonerde . . .	0,42 „	0,56 „
Kalk	72,68 „	97,19 „
Magnesia	0,57 „	0,76 „
Rest (Alkalien usw.)	0,53 „	0,71 „

Tab. 116. **Ablöschung des Kalkes.**

Gewicht für 1 l Stückkalk in Walnußgröße	Ablöschung zu Kalkteig								Ablöschung zu Kalkpulver										
	Wasseranspruch	Beginn des Löschens nach	Dauer des Löschens nach	5 kg Stückkalk ergaben an Kalkteig G	5 kg Stückkalk ergaben an Kalkteig J	Gehalt an steinigen Rückständen	1 l Kalkteig wog berechnet aus G/J	1 l Kalkteig wog im Litergefäß eingerüttelt	Wasseranspruch	Beginn des Löschens nach	Dauer des Löschens nach	5 kg Stückkalk ergaben an Kalkpulver (ungesiebt) G	Gehalt an steinigen Rückständen	1 kg Kalkpulver wog ungesiebt R_f	1 kg Kalkpulver wog ungesiebt R_r	1 kg Kalkpulver wog gesiebt R_f	1 kg Kalkpulver wog gesiebt R_r	Rauminhalt des Kalkpulvers aus 5 kg Stückkalk $\frac{G}{R_f}$	Rauminhalt des Kalkpulvers aus 5 kg Stückkalk $\frac{G}{R_r}$
kg	%	Min.	Min.	kg	l	%	kg	kg	%	Min.	Min.	kg	%	kg	kg	kg	kg	l	l
0,837	302,0	6	11	18,95	15,75	0,0	1,203	1,362[1]	45,0	1/2	4	6,70	0,2	0,534	0,771	0,425	0,746	12,55[2] 15,58[3]	8,69[2] 8,87[3]

1) Nach der Durchschickung des Kalkteiges durch das 120-Maschensieb und Absaugung bis auf einen Wassergehalt von 50 %.
2) Rauminhalt des ungesiebten Kalkpulvers.
3) „ „ gesiebten „

Tab. 117. Eigenschaften der Mörtelstoffe.

Mörtelstoff	Raumgewicht eingelaufen R_f kg	Raumgewicht eingerüttelt R_r kg	Raumgewicht eingefüllt[1] R_l kg	Spezifisches Gewicht s	Dichtigkeitsgrad $\mathfrak{d}$	Undichtigkeitsgrad $\mathfrak{u}$	Glühverlust %	Rückstand %	Korngröße bezw. Mahlfeinheit (siehe Fig. 77) — Siebe mit der übergeschriebenen Anzahl Maschen für 1 qcm: 9	20	60	120	324	600	900	5000	S
Kalkteig	1,245	—	—	—	—	—	—	Auf den Sieben	—	—	—	—	—	—	—	—	
								Zwischen je 2 Sieben	—	—	—	—	—	—	—	—	
Portland-Zement	1,220	2,020	1,232	3,101[2]	0,651	0,349	3,51	Auf den Sieben	—	—	—	0,0	0,2	0,8	1,0	16,0	—
								Zwischen je 2 Sieben	—	0,0	—	0,0	0,2	0,6	0,2	15,0	84,0
Traß	0,940	1,482	1,013	2,370[3]	0,625	0,375	9,78[4]	Auf den Sieben	0,3	1,2	2,0	4,0	6,0	14,0	16,0	41,0	—
								Zwischen je 2 Sieben	0,3	0,9	0,8	2,0	2,0	8,0	2,0	25,0	59,0
Mauersand (Freienwalder Rohsand)	1,575	1,849	1,610	2,655	0,697	0,303	—	Auf den Sieben	—	0,0	27,0	54,5	77,0	—	89,5	—	—
								Zwischen je 2 Sieben	—	0,0	27,0	27,5	22,5	—	12,5	—	10,5

1) Im 10 l-Gefäß ermittelt.
2) Spezifisches Gewicht nach dem Glühen: 3,226.
3) „ „ „ „ Trocknen bei + 98 C°: 2,387.
4) Gehalt des Trasses an hygroskopischem Wasser 2,89 %, an Hydratwasser 7,09 %.

Tab. 118. Raumgewicht der Körper zu Tab. 119. (Siehe Fig. 78.)

Mittelwerte aus je fünf Einzelversuchen.

Art der Probenlagerung	Mittleres Raumgewicht (g/ccm) der Zugproben nach 2 Tagen	28 Tagen	3 Monaten	6 Monaten	1 Jahr	Druckproben nach 2 Tagen	28 Tagen	3 Monaten	6 Monaten	1 Jahr
1 Rtl. Zement + 6 Rtl. Mauersand + 2 Rtl. Kalkteig (Wasser 7,0 %)										
An der Luft	2,186	2,186	2,214	2,214	2,243	2,245	2,132	2,135	2,144	2,161
Unter Luftabschluß	2,271	2,271	2,271	2,257	2,257	2,245	2,237	2,231	2,220	2,208
1 Rtl. Zement + 6 Rtl. Mauersand + 1 Rtl. Kalkteig (Wasser 6,0 %)										
An der Luft	2,171	2,114	2,129	2,143	2,157	2,115	2,051	2,054	2,062	2,076
Unter Luftabschluß	2,171	2,171	2,157	2,157	2,157	2,113	2,113	2,107	2,104	2
1 Rtl. Zement + 3 Rtl. Mauersand (Wasser 8,0 %)										
An der Luft	2,200	2,171	2,200	2,200	2,214	2,163	2,115	2,118	2,124	2,138
Unter Luftabschluß	2,200	2,200	2,200	2,200	2,200	2,163	2,144	2,144	2,141	2,141
3 Rtl. Traß + 1 Rtl. Mauersand + 2 Rtl. Kalkteig (Wasser 17,0 %)										
An der Luft	1,914	1,700	1,714	1,714	1,729	1,924	1,710	1,687	1,687	1,701
Unter Luftabschluß	1,914	1,857	1,857	1,843	1,843	1,924	1,901	1,897	1,890	1,879

Tab. 119. **Ergebnisse der Lagerung an der Luft.**

Versuch Nr.	Zugfestigkeit in kg/qcm nach				Druckfestigkeit in kg/qcm nach				Verhältnis $\frac{Zug}{Druck}$ für			
	28 Tagen	3 Monaten	6 Monaten	1 Jahr	28 Tagen	3 Monaten	6 Monaten	1 Jahr	28 Tage	3 Monate	6 Monate	1 Jahr
1 Raumteil Zement + 2 Raumteile Kalkteig + 6 Raumteile Mauersand												
1	5,6	8,1	5,8	5,4	80	69	74	77	—	—	—	—
2	9,3	7,0	5,6	3,7	77	78	80	90	—	—	—	—
3	8,6	4,2	5,4	4,6	80	76	83	84	—	—	—	—
4	9,3	7,3	4,8	10,4	83	78	84	86	—	—	—	—
5	8,7	7,4	4,5	4,2	77	94	84	80	—	—	—	—
Mittel	**8,3**	**6,8**	**5,2**	**5,7**	**79**	**79**	**81**	**83**	$\frac{1}{9,5}$	$\frac{1}{11,6}$	$\frac{1}{15,6}$	$\frac{1}{14,6}$
1 Raumteil Zement + 1 Raumteil Kalkteig + 6 Raumteile Mauersand												
1	5,3	8,7	8,0	11,1	85	104	107	125	—	—	—	—
2	8,2	8,4	8,4	9,8	91	99	106	124	—	—	—	—
3	5,1	7,2	10,5	4,9	99	107	122	123	—	—	—	—
4	4,6	9,3	7,6	5,6	84	100	118	118	—	—	—	—
5	7,6	8,4	10,7	10,6	87	95	117	117	—	—	—	—
Mittel	**6,2**	**8,4**	**9,0**	**8,4**	**89**	**101**	**114**	**121**	$\frac{1}{14,4}$	$\frac{1}{12,0}$	$\frac{1}{12,7}$	$\frac{1}{14,4}$
1 Raumteil Zement + 3 Raumteile Mauersand												
1	22,5	26,4	35,3	42,5	192	217	247	275	—	—	—	—
2	28,0	28,1	30,5	44.8	224	222	261	279	—	—	—	—
3	25,8	27,9	37,6	41,3	197	208	249	282	—	—	—	—
4	27,2	28,5	34,6	41,2	198	240	243	279	—	—	—	—
5	21,2	28,5	36,8	38,5	214	217	235	260	—	—	—	—
Mittel	**24,9**	**27,9**	**35,0**	**41,7**	**205**	**221**	**248**	**275**	$\frac{1}{8,2}$	$\frac{1}{7,9}$	$\frac{1}{6,9}$	$\frac{1}{6,6}$
3 Raumteile Traßmehl + 1 Raumteil Mauersand + 2 Raumteile Kalkteig												
1	15,1	18,1	11,9	20,3	103	154	160	154	—	—	—	—
2	9,0	8,3	9,8	12,0	124	150	157	148	—	—	—	—
3	8,0	10,0	10,4	10,8	118	144	175	145	—	—	—	—
4	10,6	9,2	9,0	8,9	111	149	145	161	—	—	—	—
5	7,6	8,7	9,0	9,6	113	121	126	140	—	—	—	—
Mittel	**10,1**	**10,9**	**9,1**	**12,3**	**114**	**142**	**153**	**150**	$\frac{1}{11,3}$	$\frac{1}{13,1}$	$\frac{1}{15,3}$	$\frac{1}{12,2}$

Festigkeitsprüfungen. (Siehe Fig. 79 u. 80.)

Lagerung unter Luftabschluß.

Versuch Nr.	Zugfestigkeit in kg/qcm nach				Druckfestigkeit in kg/qcm nach				Verhältnis Zug/Druck für			
	28 Tagen	3 Monaten	6 Monaten	1 Jahr	28 Tagen	3 Monaten	6 Monaten	1 Jahr	28 Tage	3 Monate	6 Monate	1 Jahr
1 Raumteil Zement + 2 Raumteile Kalkteig + 6 Raumteile Mauersand												
1	12,0	6,5	12,2	10,5	81	110	117	130	—	—	—	—
2	8,9	11,5	12,8	10,0	89	113	118	145	—	—	—	—
3	7,0	14,7	13,3	9,0	85	115	139	134	—	—	—	—
4	9,2	8,5	10,7	10,7	81	111	124	140	—	—	—	—
5	8,0	7,3	11,3	11,6	86	105	125	131	—	—	—	—
Mittel	**9,0**	**9,7**	**12,1**	**10,4**	**84**	**111**	**124**	**136**	1/9,3	1/11,4	1/10,2	1/13,1
1 Raumteil Zement + 1 Raumteil Kalkteig + 6 Raumteile Mauersand												
1	8,1	10,6	10,8	11,2	100	114	121	158	—	—	—	—
2	9,0	12,3	13,5	12,4	92	126	143	155	—	—	—	—
3	8,8	11,6	12,0	11,9	106	124	136	125	—	—	—	—
4	10,1	9,2	10,5	13,0	102	124	128	143	—	—	—	—
5	9,2	10,3	10,8	12,5	97	104	138	159	—	—	—	—
Mittel	**9,0**	**10,8**	**11,5**	**12,2**	**98**	**118**	**133**	**148**	1/10,9	1/10,9	1/11,6	1/12,1
1 Raumteil Zement + 3 Raumteile Mauersand												
1	24,4	29,0	33,1	30,9	226	250	284	285	—	—	—	—
2	28,5	22,0	27,2	26,0	214	253	287	274	—	—	—	—
3	25,3	27,9	25,4	28,7	240	270	270	283	—	—	—	—
4	20,9	30,9	26,6	34,2	228	276	262	254	—	—	—	—
5	24,1	28,4	32,0	29,2	227	264	286	282	—	—	—	—
Mittel	**24,6**	**27,6**	**28,9**	**29,8**	**225**	**263**	**278**	**276**	1/9,1	1/9,5	1/9,6	1/9,3
3 Raumteile Traßmehl + 1 Raumteil Mauersand + 2 Raumteile Kalkteig												
1	11,0	24,6	26,2	23,7	138	200	231	250	—	—	—	—
2	14,1	30,5	24,8	24,9	147	177	226	252	—	—	—	—
3	10,2	30,8	22,0	23,1	146	187	225	248	—	—	—	—
4	12,2	19,4	21,2	23,1	150	180	237	257	—	—	—	—
5	8,8	19,5	19,0	22,7	146	158	210	232	—	—	—	—
Mittel	**11,3**	**25,0**	**22,6**	**23,5**	**146**	**180**	**226**	**248**	1/12,9	1/7,2	1/10,0	1/10,6

Tab. 120. **Verhältniszahlen zu Tab. 119.**

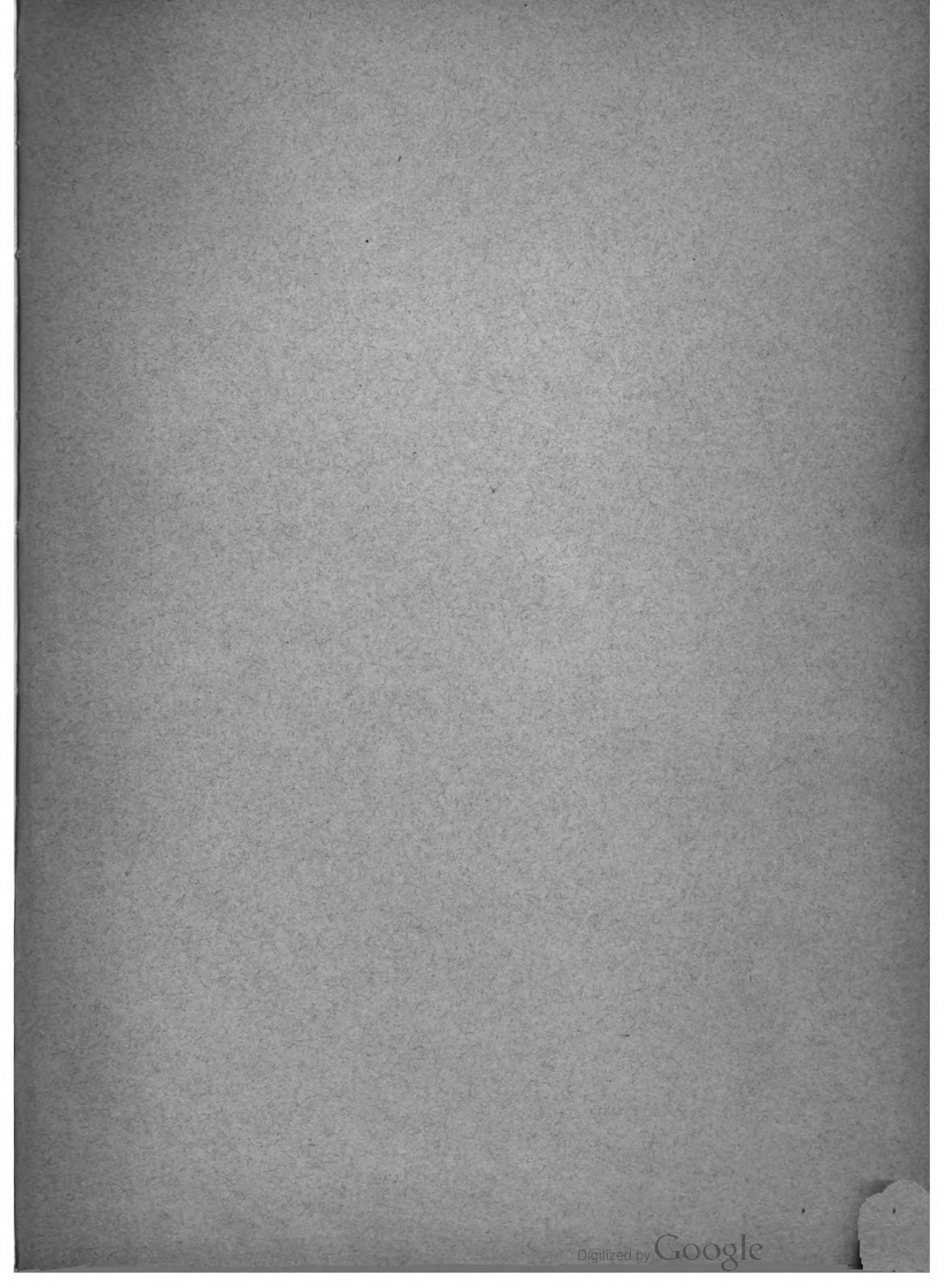
Festigkeiten der Luftproben = 100.

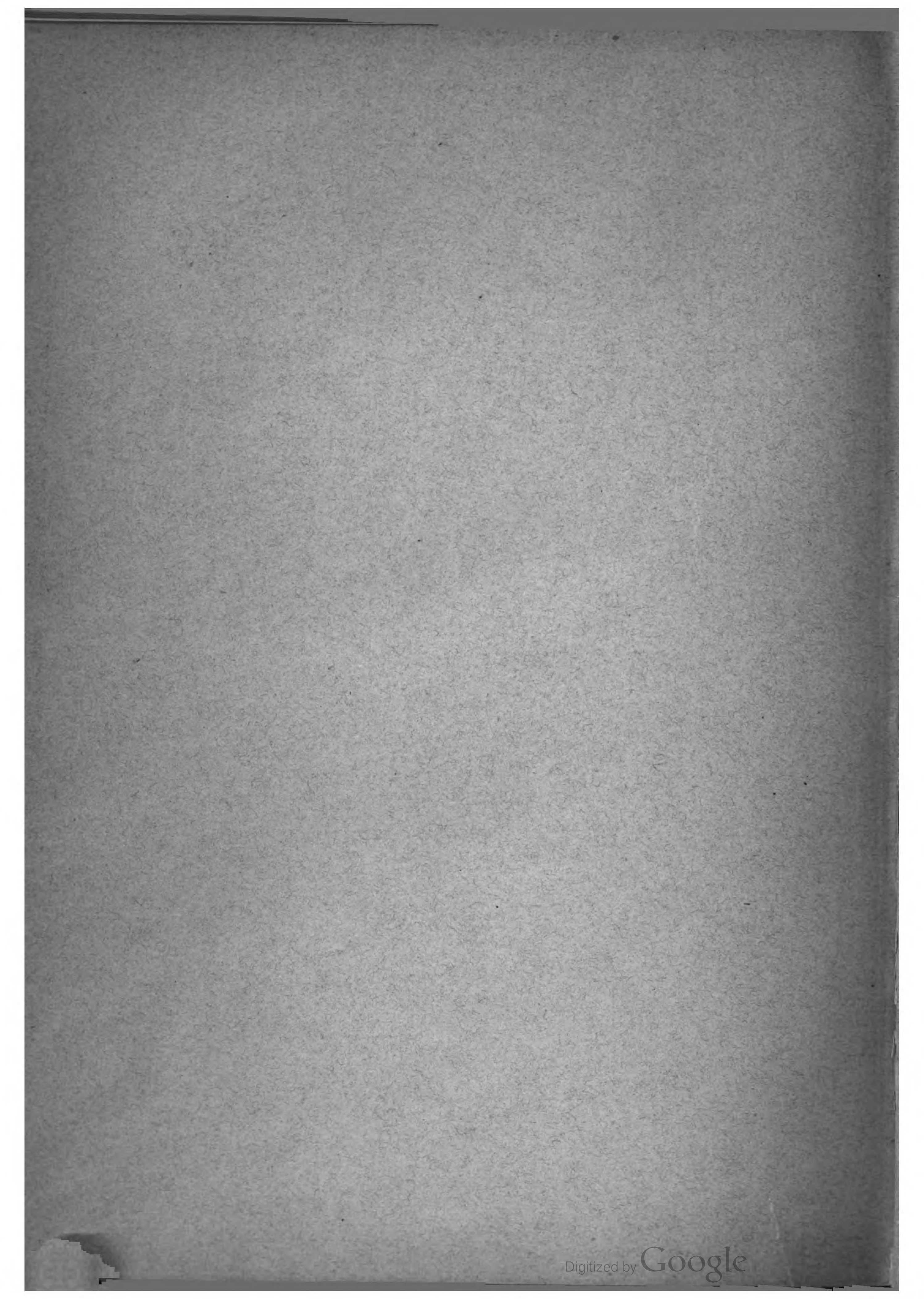
Art der Probeulagerung	Zugfestigkeit				Druckfestigkeit			
	28 Tage	3 Monate	6 Monate	1 Jahr	28 Tage	3 Monate	6 Monate	1 Jahr
1 Rtl. Zement + 6 Rtl Mauersand + 2 Rtl. Kalkteig								
An der Luft . . .	100	100	100	100	100	100	100	100
Unter Luftabschluß .	108	143	233	200	106	140	153	164
1 Rtl. Zement + 6 Rtl. Mauersand + 1 Rtl. Kalkteig								
An der Luft . . .	100	100	100	100	100	100	100	100
Unter Luftabschluß .	134	129	128	145	110	116	117	122
1 Rtl. Zement + 3 Rtl. Mauersand								
An der Luft . . .	100	100	100	100	100	100	100	100
Unter Luftabschluß .	99	99	83	72	110	119	114	100
3 Rtl. Traß + 1 Rtl. Mauersand + 2 Rtl. Kalkteig								
An der Luft . . .	100	100	100	100	100	100	100	100
Unter Luftabschluß .	112	230	248	191	128	127	148	165

Ob sich ein solcher Einfluß unter praktischen Verhältnissen, unter denen der Mörtel mauergerecht verarbeitet wird und in mehr oder weniger dünnen Fugen zwischen den Mauersteinen lagert, vielleicht doch geltend macht, könnte nur durch planmäßige Versuche mit großen Mauerwerkskörpern nachgewiesen werden. Es ist jedoch nicht anzunehmen, daß hierbei ein anderes Ergebnis erzielt wird.

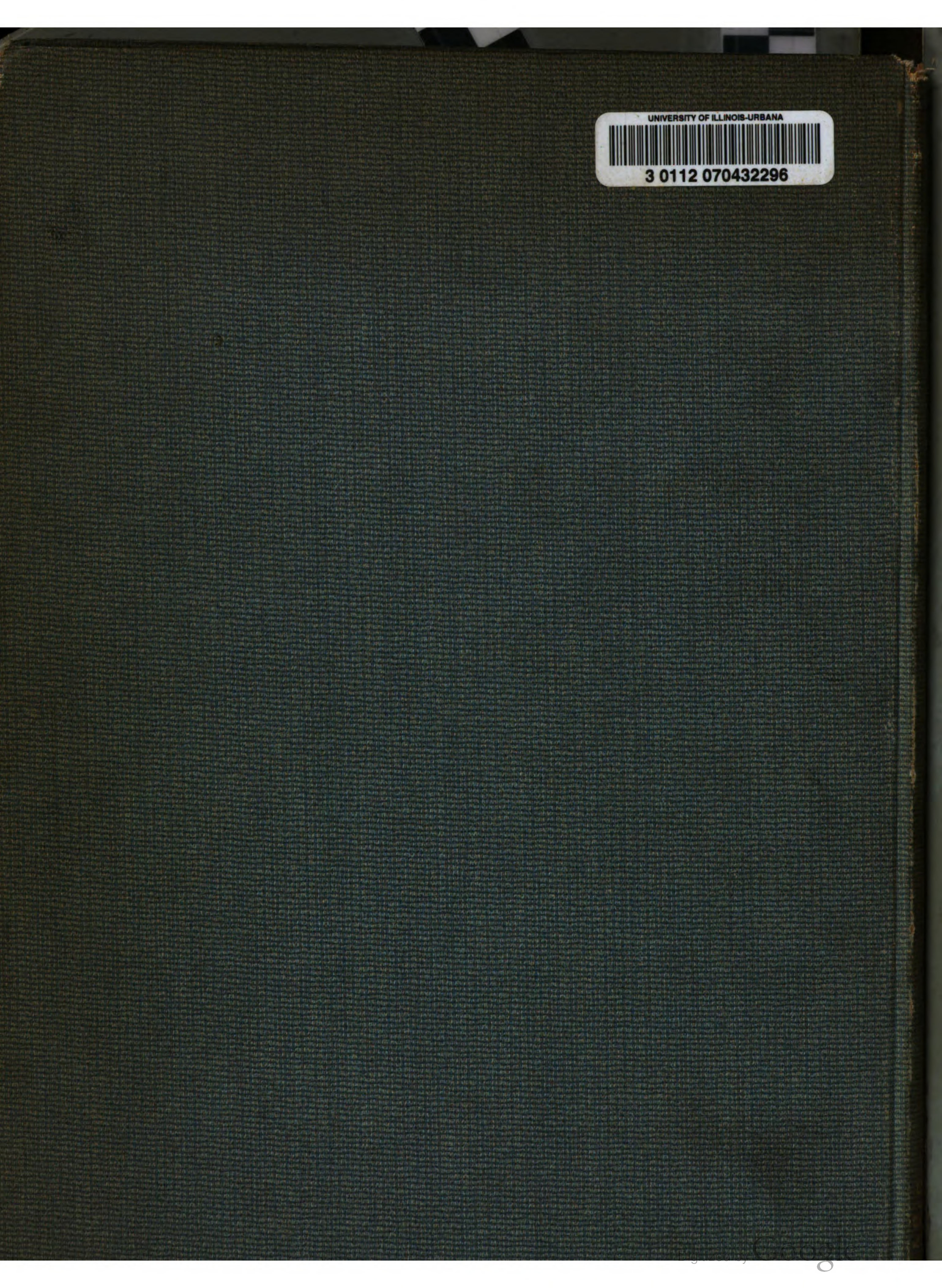
Es würde mich freuen, wenn durch die vorliegende Arbeit das angestrebte Ziel, einiges zur weiteren Erkenntnis der mörteltechnischen Eigenschaften der Luftkalke und Luftkalkmörtel beizutragen und Aufschluß über die Beziehungen zwischen Stein-, Mörtel- und Mauerwerksfestigkeit zu schaffen, in etwa erreicht worden ist. Leider gestatteten es bislang die Verhältnisse der Abteilung für Baumaterialprüfung des Kgl. Materialprüfungsamtes nicht, das Studium weiterer Fragen, deren Lösung erwünscht schien, wie z. B. die Erhärtungstheorie der Luftkalke, zu verfolgen. Dies soll Ziel fernerer Untersuchungen sein.

Immerhin dürften die Ergebnisse der Versuche mit Luftkalken und deren Mörteln bereits eine brauchbare Unterlage zur Aufstellung von Normen für die Prüfung und Lieferung solcher Kalke und Mörtel bilden.






G.E. STECHERT & Co
(ALFRED HAFNER)
NEW YORK


UNIVERSITY OF ILLINOIS-URBANA
3 0112 070432296